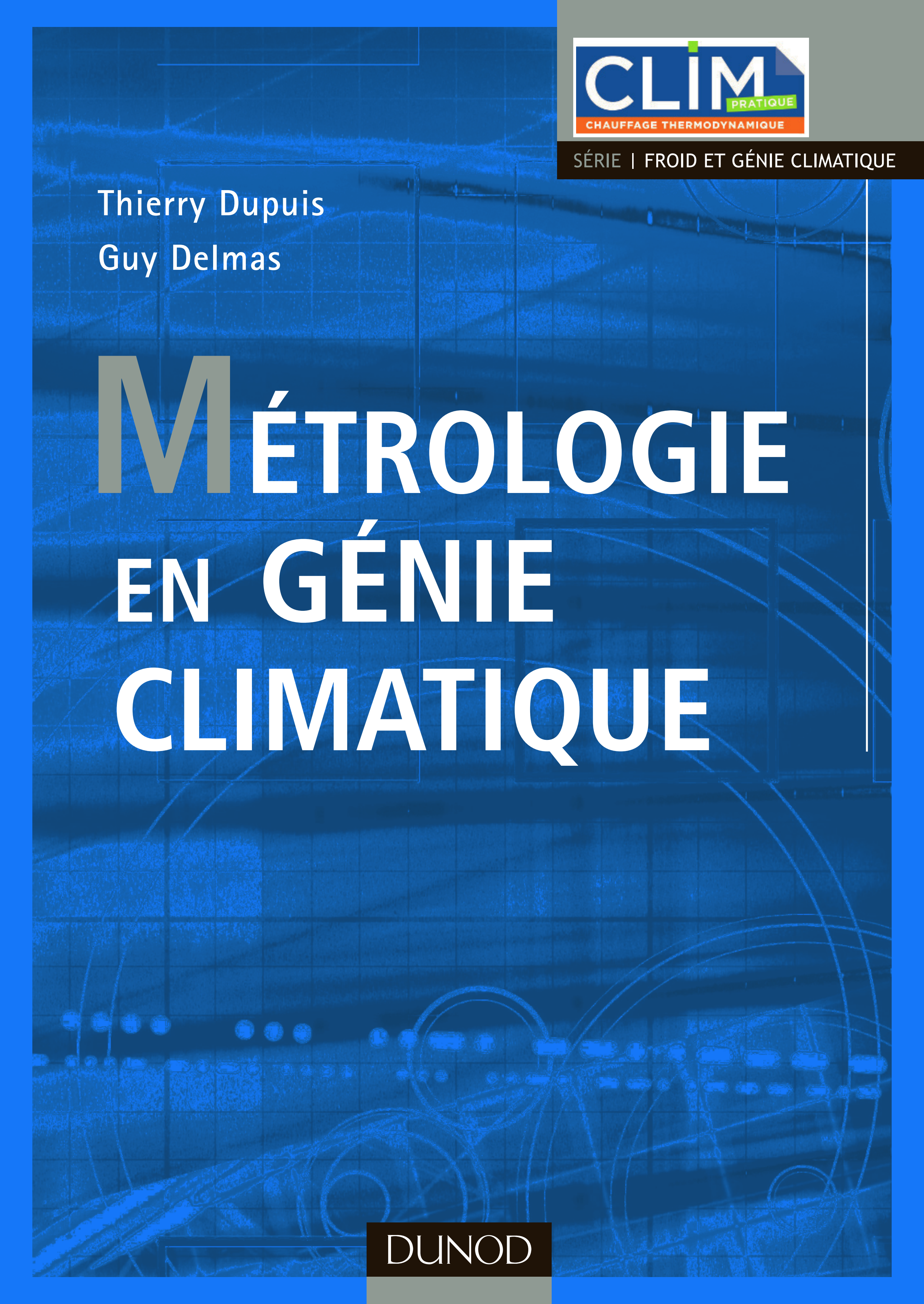


SÉRIE | FROID ET GÉNIE CLIMATIQUE

Thierry Dupuis
Guy Delmas

MÉTROLOGIE EN GÉNIE CLIMATIQUE

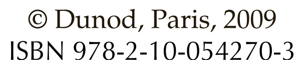
DUNOD

Thierry Dupuis
Guy Delmas

Métrologie en génie climatique



DUNOD



ISBN 978-2-10-054270-3

PRÉFACE

Les défis énergétiques auxquels nous sommes confrontés affectent très largement le monde du bâtiment et pour cause : ce secteur représente 42,5 % de l'énergie finale consommée pour prendre les chiffres français. L'objectif de réduction d'un facteur 4 des émissions dans le bâtiment ne peut être envisagé que par des actions fortes accompagnées de vérification régulière de leur efficacité. Bâtiments basse consommation, Bâtiments à énergie neutre ou positive ; tout ceci suppose non seulement des actes de conception mais aussi des pratiques de mise au point, de diagnostic et de suivi.

Sans nul doute, une plus grande technicité des acteurs du génie climatique sera requise dans les années qui viennent, d'autant que le climaticien devra intervenir non seulement sur les installations « traditionnelles » mais aussi sur celles qui apparaissent et surgiront, faisant appel aux énergies renouvelables, généralement pourvues d'exigences fortes en régulation voire en optimisation.

La notion de commissionnement permanent devra devenir une réalité si on ne veut pas que nos objectifs de réduction des consommations restent de simples déclarations d'intention. Et ceci devra se faire face à des occupants réclamant non seulement du confort thermique mais plus globalement des ambiances où l'on se sent bien, ce qui inclut notamment un souci de bien-être sonore.

Contrôler les performances, s'assurer de leur maintien dans le temps, mesurer des consommations et des niveaux sonores in situ, équilibrer des réseaux, s'engager sur des résultats et prendre des engagements contractuels, autant de missions pour les acteurs du Génie climatique.

Si la littérature technique aborde fréquemment la question de la mesure, il faut admettre que l'information est dispersée et rarement orientée vers une profession en particulier. Faire connaître la palette des outils qui s'offre au praticien du génie climatique, le conseiller dans son usage tel est l'objectif de cet ouvrage.

À cet égard, la qualité des auteurs qui sont de véritables experts de la mesure *in situ* apporte un regard pratique sur cette matière. Il ne s'agit pas seulement d'expliquer comment fonctionnent tel ou tel appareil mais aussi d'aider au choix, conseiller dans la mise en œuvre et le respect des conditions opératoires.

Il est remarquable qu'un thermicien et un acousticien se soient unis pour couvrir ce champ large et pluri disciplinaire. Il est également précieux que des professionnels chevronnés cherchent à transmettre leurs connaissances et leur savoir faire. Enfin,

c'est avec un plaisir particulier que je préface T. DUPUIS qui fut élève d'ISUPFERE, cycle d'ingénieur de MINES ParisTech. Je connais en effet sa rigueur et son souci de partager.

Dominique MARCHIO
Professeur à MINES ParisTech

TABLE DES MATIÈRES

B

Les mesures de débits hydrauliques

par T. Dupuis

C

Les mesures de température

par T. Dupuis

D

Les mesures d'hygrométrie

par T. Dupuis

E

Les mesures de pression

par T. DUPUIS

F

Les mesures de combustion

par T. DUPUIS

G

Les mesures acoustiques et vibratoires

par G. DELMAS

H

Rappels de métrologie

par T. DUPUIS

AVANT-PROPOS

« Ce n'est pas ce que l'on reçoit qui fait ce que nous sommes,
c'est ce que l'on donne aux autres. »
Jacques ATTALI, avec l'aimable autorisation de l'auteur

Lorsque j'ai commencé mes études techniques au début des années 1970, le premier ouvrage appliqué qu'il m'a été donné de lire est un traité pédagogique sur le chauffage et la climatisation. En deuxième page de couverture est inscrit (j'ai toujours ce « bréviaire ») une citation du philosophe Kuan-Tzu :

« Si tu donnes un poisson à un homme, il se nourrira une fois. Si tu lui apprends à pêcher, il se nourrira toute sa vie. »

C'est dans cet esprit que j'ai eu l'idée d'écrire cet ouvrage qui s'adresse aux différents acteurs du domaine du génie climatique.

En effet, il m'est souvent arrivé de constater que le manque de référentiel se faisait sentir parmi les différents intervenants pour l'application de la métrologie dans le domaine du génie climatique, et que les mêmes informations étaient nécessaires au quotidien.

Ce défaut d'information sur les méthodes de mesurage envisageables et sur les moyens disponibles selon la grandeur physique à évaluer m'a semblé être une voie à améliorer.

À toutes les étapes de la vie d'une installation, que ce soit à sa mise en service, lors de sa réception, lors de son commissionnement, lors du suivi de ses performances et de son exploitation, et même lors d'expertises s'il y a lieu, les méthodes de mesurage et les moyens associés sont rarement définis, voire même appréhendés.

Manipuler un appareil de mesure est rendu facile par son ergonomie et l'ingéniosité des constructeurs, mais savoir comment il fonctionne pour l'employer au mieux de ses capacités, et l'utiliser selon une méthode de mesure normalisée ou au minimum reconnue, permet de mieux apprécier le résultat.

Le partage de mes acquis complétés avec ceux de Guy pour la partie acoustique et vibrations, m'a semblé pertinent en les regroupant dans un ouvrage où les différentes références seraient aussi détaillées par domaine d'utilisation.

Les différents types de mesurages exposés, ainsi que les matériels associés, sont ceux d'usage courant. D'autres moyens sont sans doute disponibles, Guy et moi vous les exposerons lors d'édition(s) future(s) si vous nous faites part de votre intérêt pour ce domaine très vaste qu'est la métrologie dans le domaine du génie climatique qui nous concerne tous de plus en plus.

Thierry DUPUIS

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Nadine pour son soutien depuis le début de ce projet, et pour sa patience ensuite, ainsi que Julien et Jérémy pour leur compréhension.

À Cyril BARRE pour ses remarques (très) pertinentes et pour ses compétences avisées,

À David COHEN pour ses conseils très précieux dans le domaine de l'ingénierie de la mesure hydraulique.

Merci à Guy pour avoir accepté de participer à cette aventure.

Thierry DUPUIS

À mon entourage qui m'a permis de me consacrer à la rédaction d'une partie de cet ouvrage.

À Jean-Marc DAUTIN pour l'efficacité de sa relecture.

À Thierry, qui m'a proposé de rédiger la partie acoustique de cet ouvrage, ma première expérience d'auteur.

Guy DELMAS

Nos remerciements tout particuliers à Dominique MARCHIO pour sa relecture, pour ses conseils et pour sa préface qui nous honore.

Nos remerciements aux sociétés Kimo, Engineering Mesures, Testo, Ahlborn, TH Industrie, 01 dB-Metravib, Trox Technik, Krohne SAS, Swegon, Ultraflux, Endress & Hauser, Kobold Instrumentation, Lutz, Validyne, Vega et les Techniques de l'Ingénieur (T.I.) pour les ressources documentaires mises à notre disposition.

Thierry DUPUIS et Guy DELMAS

INTRODUCTION

Le domaine du génie climatique fait appel à différentes connaissances pour concevoir et réaliser les installations techniques. In fine, la qualité de cette réalisation devra être validée à l'aune de mesurages de paramètres physiques très divers.

De même, l'exploitation des installations nécessite périodiquement des vérifications de performances afin de confirmer le respect des engagements pris par les entreprises.

L'aspect réglementaire complète l'aspect contractuel dans tous les domaines du génie climatique. Les contraintes environnementales imposent des paramètres de fonctionnement très rigoureux et des rendements de génération en vue de limiter les consommations d'énergie. La dégradation de notre sphère vitale est accentuée par l'impact de chacune de nos faiblesses.

L'examen des performances d'une installation tout au long de son activité nécessite l'application de méthodes de mesurage bien définies, mais hélas souvent ignorées.

Il est vrai que la variété des grandeurs physiques à quantifier imposent la connaissance de méthodes métrologiques différentes et de moyens techniques adaptés.

L'objet de cet ouvrage est de permettre aux différents intervenants sur les installations de génie climatique, de disposer des moyens de mesurage et des méthodes appliquées dans les domaines de l'aéraulique, de l'hydraulique, de la thermique, de l'hygrométrie, de la pression, de la combustion, de l'acoustique et des vibrations.

Il a été mis en annexe de chaque partie des notions de physiques et différents rappels approfondis qui viennent compléter les différents aspects pratiques énoncés.

Ce recueil se termine par des rappels de métrologie décrivant les méthodes d'évaluation des incertitudes et des erreurs de mesurage, avec des exemples appliqués, nécessaires pour relativiser les résultats obtenus.

Chaque partie comporte une bibliographie qui permettra au lecteur de prendre connaissance notamment de l'intégralité des textes réglementaires et des normes de référence.

Cet ouvrage s'adresse plus particulièrement :

– aux entreprises du génie climatique ;
– aux bureaux d'études techniques « fluides » ;
– aux entreprises de mise au point et de comissionnement des installations ;
– aux bureaux de contrôle ;
– aux sociétés chargées de l'exploitation des installations ;

– aux Maîtres d'ouvrage ;
– aux experts dans le domaine du génie climatique ;
– aux étudiants de la filière.

Thierry DUPUIS

A

Les mesures de débits aérauliques

1 • LES MOYENS DE MESURAGE

Les mesures de débits d'air peuvent être réalisées de différentes manières selon les cas, soit par mesures intrusives directement dans la gaine, soit par mesures non-intrusives par l'extérieur de la gaine, soit au niveau de l'équipement terminal (diffuseurs, bouche, grille, etc.).
On privilégiera les mesures en gaines car l'exploration des champs de vitesse se fait indépendamment de l'environnement extérieur, ce qui élimine déjà une source de perturbation, donc d'erreur en moins.
Dans le cas des installations courantes de génie climatique, on retiendra que :

- le fluide est de l'air à température et pression voisines de celles de l'air ambiant ;
- l'air peut être considéré comme un gaz parfait à capacités thermiques constantes ;
- les débits étant parfois réduits, les nombres de Reynolds à considérer sont alors relativement faibles (de l'ordre de quelques milliers) ;
- le nombre de Mach est inférieur à 0,25.

On pourra trouver en annexes au présent chapitre la justification de certains principes retenus.
Le début de ce chapitre abordera donc les moyens dont disposent les techniciens pour procéder à ces mesures dans les réseaux, puis nous exposerons les appareils dits « noyés » dans les longueurs droites, et enfin nous détaillerons les moyens à mettre en œuvre pour les mesures à réaliser sur les terminaux.

1.1 Le tube de Pitot double

Très utilisé dans le domaine du génie climatique, le tube de Prandtl ou tube de « Pitot double », appelé plus couramment tube de « Pitot », permet de déterminer la vitesse d'un flux dans une veine d'air.
Ses principales qualités sont sa robustesse et sa plage de fonctionnement pouvant aller jusque 100 m/s. Par contre, il faut éviter de l'utiliser à moins de 1,5 m/s en limite basse.
Parfois réalisé en inconel, il peut supporter des températures jusqu'à 300 °C, pour être utilisé dans des conduits de cheminée de chaufferie ou d'installation de cogénération.
Un autre de ses avantages, mais qui peut devenir un inconvénient comme nous le verrons en détail ci-après, est qu'il est sensible à la direction du flux. Cette particularité permet de l'utiliser par exemple dans un plénum d'air reliant plusieurs équipements pour vérifier le sens de l'écoulement.

1.1.1 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement du tube de Pitot (du nom de son inventeur Henri PITOT, physicien français, né en 1695, décédé en 1771) repose sur la mesure simultanée de deux pressions distinctes ; la pression totale dans la veine d'air et la pression statique régnant dans le conduit, permettant de calculer la pression dynamique et d'en déduire la vitesse correspondante.

La forme coudée du tube de Pitot permet de l'introduire dans la gaine et de placer le tronçon rectiligne avec son extrémité ouverte face au courant. Par cette extrémité sera mesurée la pression totale de l'air dans la gaine (appelée pression d'arrêt) et par les orifices périphériques sera mesurée la pression statique exercée par le fluide.

Cette vitesse découle de l'application de théorèmes physiques appliqués aux cas des fluides incompressibles et non visqueux décrits par Daniel BERNOUILLI (physicien néerlandais, né en 1700 et décédé en 1782), alors que l'air est un fluide compressible comme tous les autres gaz.

Les hypothèses qui ont été retenues pour cette application correspondent aux conditions de mesurage rencontrées dans les installations de génie climatique :

- vitesse de l'air inférieure à la vitesse du son,
- force due à la pesanteur négligeable,
- régime continu et invariable dans le temps.

Voir les détails de la démonstration en annexe du présent chapitre pour plus d'information.

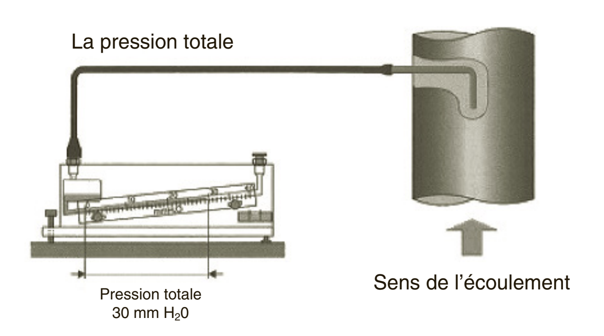
L'utilisation de sonde de pression pour la mesure de la vitesse d'un fluide est très couramment pratiquée dans le domaine du génie climatique. On peut rencontrer principalement trois types différents de ces sondes appelées « tube de Prandtl », « tubes de Pitot double » ou plus simplement « tube de Pitot » (voir ci-après le type AMCA, le type NPL et le type CETIAT) décrits dans la norme NF X 10-112. Toutes trois fonctionnent sur le même principe de détermination de la vitesse au point de mesure.

On peut également rencontrer le « tube de Pitot en S », décrit dans la norme ISO 10780, plus couramment utilisé pour effectuer des mesures de vitesse en même temps que des prélèvements de gaz en vu de les analyser. Le principe de fonctionnement est le même que pour les trois autres types mais les orifices de mesures de pression totale et statique sont plus largement dimensionnés pour éviter leur obstruction trop fréquente par des matières solides en suspension dans les fluides gazeux (par exemple produit de combustion d'une chaudière ou d'un four d'incinération) et qui pourraient perturber la mesure.

Le principe est basé sur la mesure simultanée de la pression totale et de la pression statique existantes dans la gaine. En partant de l'équation :

$$Pt = Ps + Pd$$

avec :
Pt = pression totale (Pa)
Ps = pression statique (Pa)
Pd = pression dynamique (Pa)



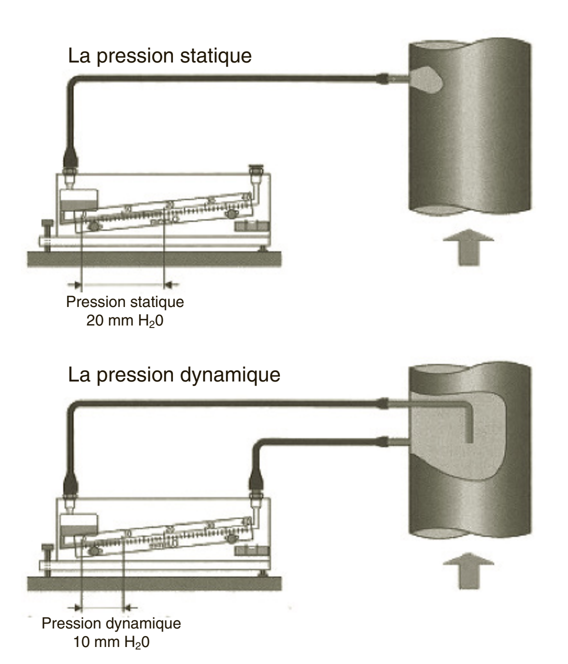


Figure 1.1 – les différentes pressions (doc. Ph. Legourd)

La pression totale étant mesurée par l'orifice situé à l'extrémité de l'étrave, et la pression statique étant mesurée par les orifices situés en périphérie de l'antenne, on peut facilement en déduire :

$$Pd = Pt - Ps = \Delta P$$

En adaptant le théorème de Bernouilli au cas des fluides compressibles et non visqueux (voir annexe 3.1), on peut en déduire l'équation de la vitesse du fluide en fonction de la pression dynamique ΔP :

$$V = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

avec :
V = vitesse au point de mesure (m/s)
ΔP = pression dynamique du fluide (Pa)
ρ = masse volumique de l'air (kg/m^3) (voir en annexe 1.8.2 la détermination de la valeur de la masse volumique de l'air en fonction de la température, du degré hygrométrique et de la pression en annexe)

Certains constructeurs de matériels de mesure intègrent un coefficient dans le calcul de la vitesse de l'air pour tenir compte du coefficient α définit par la norme NF X 10-112 comme le « coefficient d'étalonnage du tube de Pitot ». La valeur de ce coefficient est très proche de l'unité et prise généralement égale à 1,0015.

C'est pourquoi il est souvent négligé lors de la détermination de la vitesse de l'air.

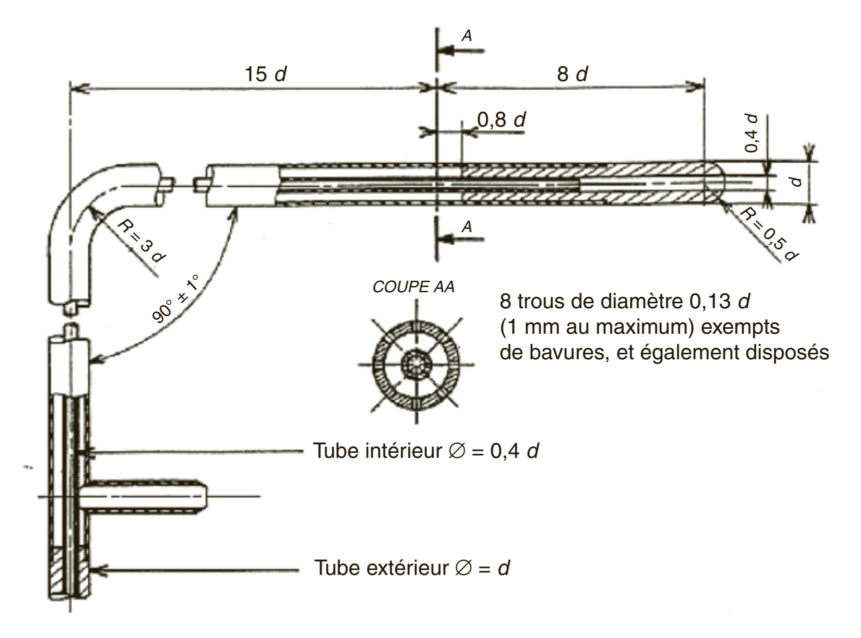


Figure 1.2 – Tube de Pitot AMCA (doc. AFNOR)

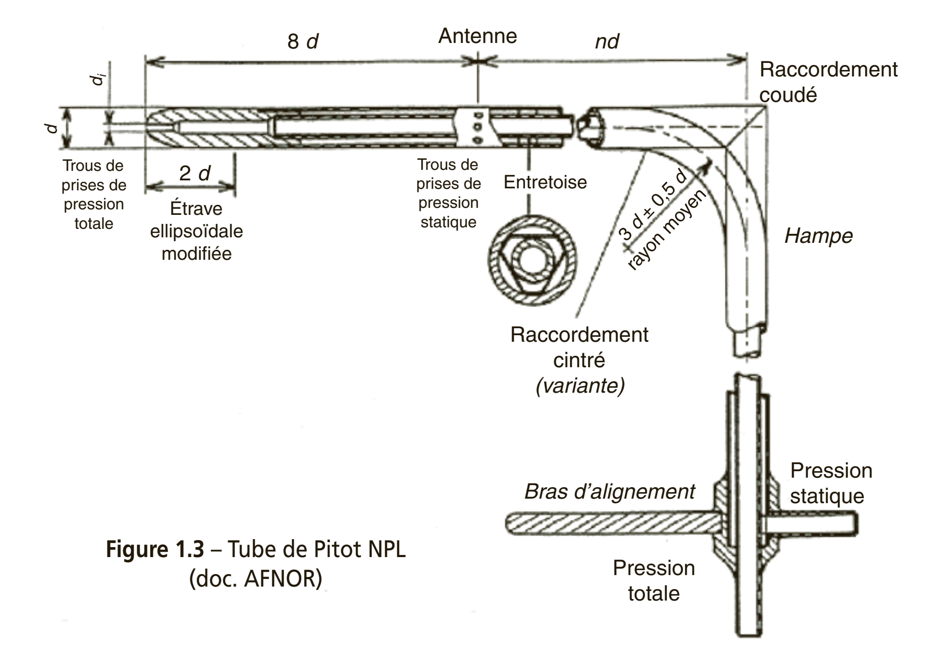


Figure 1.3 – Tube de Pitot NPL (doc. AFNOR)

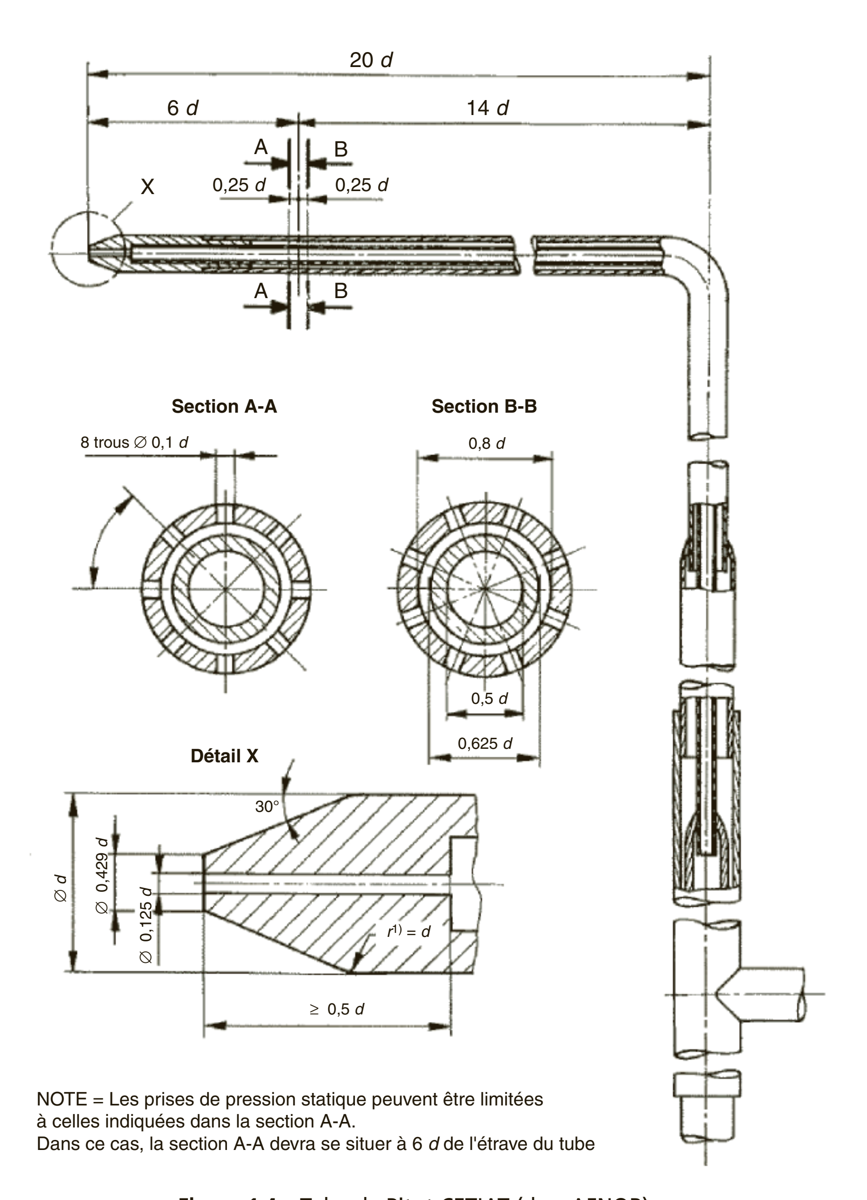


Figure 1.4 – Tube de Pitot CETIAT (doc. AFNOR)

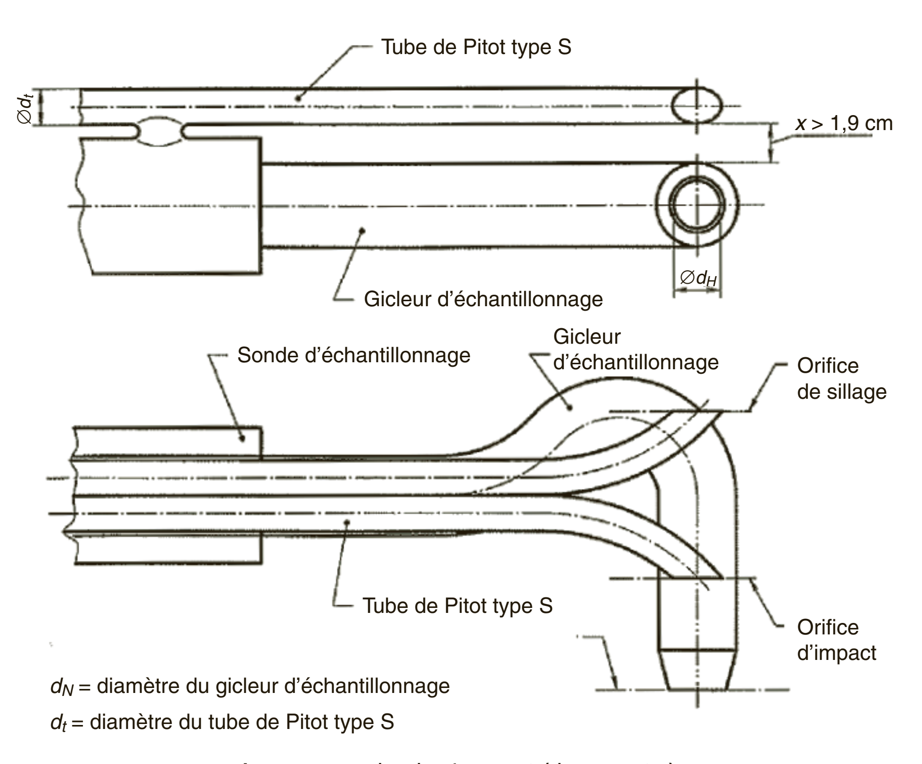


Figure 1.5 – Tube de Pitot en S (doc. AFNOR)

1.1.2 Principes de mesurage

La mesure à réaliser avec un tube de Pitot est intrusive dans la gaine, avec pour but d'explorer le champ de vitesse.

Il y a donc lieu de créer plusieurs orifices suffisamment grands pour introduire l'antenne et la hampe dans la gaine à des endroits différents. Un trou de 5 à 16 mm environ par point de mesure, selon le diamètre du tube de Pitot utilisé, convient généralement en fonction de l'épaisseur de la paroi du conduit, et un bouchon conique en caoutchouc doit être mis en place dans chaque trou après la campagne de mesure.

La répartition des points de mesure dépend de la forme du conduit (rectangulaire, circulaire, oblong…) et de ses dimensions. Le nombre du point de mesure dépend aussi de la précision du résultat que l'on souhaite. Se reporter au chapitre 2 « Les différents types de mesures de débits » ci-après à ce sujet.

L'influence du gradient transversal de vitesse et de l'effet d'obstruction dû à la hampe du tube de Pitot conduisent à des limitations dimensionnelles. Le rapport du diamètre de l'élément de mesure Φ au diamètre de la conduite $\mathbf{\Phi}$ ne doit pas dépasser les valeurs suivantes :

Les constructeurs proposent généralement des tubes de Pitot de diamètres Φ de 3 à 14 mm, ce qui permet donc, en fonction du type de mesure, leur utilisation dans des conduites de diamètre $\mathbf{\Phi}$:

Tableau 1.1 – Rapport maxi du diamètre du tube de Pitot Φ sur le diamètre de conduite Φ.

Désignation	rapport Φ/Φ
cas A = mesure au point de vitesse débitante	≤ 0,02
cas B = mesure sur l'axe de la conduite	≤ 0,06

Tableau 1.2 – Diamètre de conduite Φ max en fonction du diamètre Φ du tube de Pitot.

Désignation	Φ = 3 mm	Φ = 6 mm	Φ = 8 mm	Φ = 12 mm	Φ = 14 mm
Φ max avec cas A	≤ 150 mm	≤ 300 mm	≤ 400 mm	≤ 600 mm	≤ 700 mm
Φ max avec cas B	≤ 50 mm	≤ 100 mm	≤ 133 mm	≤ 200 mm	≤ 233 mm

Comme on le verra dans le chapitre détaillant les différents types de moyens de mesure, la longueur droite de conduite entre la section de mesure et toute singularité **en amont** doit être d'au moins 20 fois le diamètre de la conduite de section circulaire (ou 80 fois le rayon hydraulique d'une section quelconque).

La longueur droite entre la section de mesure et toute singularité située **en aval** doit être d'au moins 5 fois le diamètre de la conduite de section circulaire (ou 20 fois le rayon hydraulique d'une section quelconque).

L'exploration du champ de vitesse dans la gaine permet de déterminer la vitesse représentative du flux d'air. Si la campagne de mesure a pour but de déterminer le débit volumique de l'air ou son débit massique, il convient alors de remarquer que la principale lacune d'un tube de Pitot est de ne pas permettre de connaître directement ces valeurs. Il faut pouvoir paramétrer les dimensions de la conduite et la nature de fluide y circulant car une mesure de vitesse ne fait pas une mesure de débit.

Selon que l'on raccordera le tube de Pitot à un manomètre différentiel à colonne de liquide ou à un micro-manomètre électronique paramétrable, son utilisation sera plus ou moins pratique pour déterminer le débit circulant.

■ Tube de Pitot raccordé à un manomètre à colonne de liquide

Dans le cas de mesure basique par manomètre différentiel à colonne de liquide droit ou incliné, on lira la hauteur de liquide directement sur le tube à colonne de liquide et on calculera la pression dynamique ΔP de la façon suivante :

$$\Delta P = \rho_L \cdot g \cdot h$$

avec :

ΔP = pression de l'air dans le conduit (Pa)

ρ_L = masse volumique du fluide utilisé dans le tube en U à la température ambiante (m^3/kg)

g = force de gravité (9,806 65 m/s^2)

h = hauteur du liquide lue avec le tube en U (m)

À titre d'exemple, nous pouvons trouver des fluides de densité à 20 °C très différentes :

– alcool éthylique : densité = 0,80 kg/dm^3 ;
– toluène : densité = 0,864 kg/dm^3 ;
– benzène : densité = 0,879 kg/dm^3 (généralement de couleur rouge) ;
– eau densité ≈ 1 kg/dm^3 ;
– nitrobenzène = 1,20 kg/dm^3 ;
– type Volt 1S = 1,86 kg/dm^3 (généralement de couleur bleu) ;
– tétrabromure d'acéthylène = 2,96 kg/dm^3 (généralement de couleur jaune) ;
– mercure = 13,545 kg/dm^3 (de couleur gris métal mais maintenant inutilisé pour des raisons de pollution et de toxicité).

Cela permet de s'adapter à l'étendue de la mesure et à la résolution souhaitées.

Nota

Il convient de se rapprocher du fabricant car le fluide peut être sensible aux ultraviolets qui le font changer de couleur, voire devenir transparent lorsque ce type de manomètre est placé à l'extérieur.

La lecture de la pression avec un tube en U doit se faire en fonction de la forme du ménisque liée à la nature du fluide utilisé dans le tube lui-même.

On peut remarquer que les forces capillaires s'exercent différemment selon qu'il s'agisse d'eau ou de benzol (ménisque concave) ou de mercure (ménisque convexe). La lecture doit se faire au niveau de l'attache du liquide sur le bord du tube (voir Figure 1.6).

Au voisinage de la paroi du tube, il se forme un ménisque sous l'effet de la capillarité. Ce phénomène revêt une importance particulière avec les tubes de diamètre inférieur à 8 mm. La forme concave (cas de l'eau) ou convexe du ménisque (cas du mercure) dépend aussi de la propriété de mouillage du liquide utilisé.

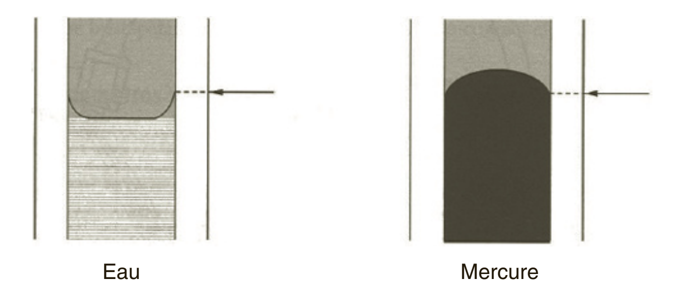


Figure 1.6 – Lecture du ménisque (Doc. Dunod)

Pour obtenir une meilleure précision, on peut trouver des tubes inclinés. Dans ce cas, on tient compte de l'angle α que fait le tube avec l'horizontale (donnée constructeur).

La pression sera calculée de la façon suivante :

$$\Delta P = \rho_L \cdot g \cdot L = \rho_L \cdot g \cdot L' \cdot \sin \alpha$$

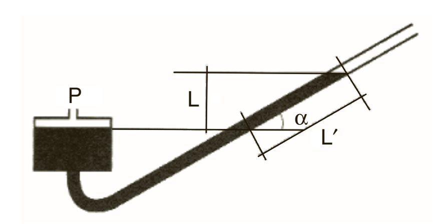


Figure 1.7 – Manomètre à tube incliné (Doc. Dunod)

On pourra calculer la vitesse de la même façon que décrite précédemment :

$$V = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

avec :
V = vitesse au point de mesure (m/s).
ΔP = pression dynamique du fluide (Pa).
ρ = masse volumique de l'air en fonction de sa température, de son hygrométrie et de la pression (kg/m^3) (voir en annexe 3.2 la méthode de calcul des valeurs de la masse volumique de l'air en fonction de la température, de l'hygrométrie et de la pression).
Pour connaître le débit, on calculera la section intérieure de la gaine et le débit volumique sera :

$$Q_v = V \cdot S$$

avec :
Q_v = débit volumique (m^3/s).
V = vitesse calculée (m/s).
S = section intérieure (m^2).
Si l'on veut connaître le débit massique, il faudra faite intervenir la masse volumique de l'air en fonction de sa température :

$$Q_m = \rho \cdot Q_v = \rho \cdot V \cdot S$$

avec :
Q_m = débit massique de l'air (kg/s).
ρ = masse volumique de l'air à la température et à la pression considérée (kg/m^3).

Tube de Pitot raccordé à un micro-manomètre électronique

La détermination du débit à partir d'un tube de Pitot raccordé à un micro-manomètre électronique est plus précise qu'avec un tube à colonne de liquide car il sera possible de considérer pratiquement les conditions de température et de pression de l'air réelles au moment de la mesure. Mais il s'avère que des « ajustements » sont faits par des fabricants pour simplifier la fabrication des matériels.
En effet, la valeur du débit volumique obtenu par les micro-manomètres fabriqués à ce jour ne prennent pas tous en considération les conditions réelles du fluide (température, hygrométrie et pression). Certains fabricants négligent ces paramètres

de l'air véhiculé en considérant arbitrairement le flux à la température de référence de 20 °C et à 0 % d'hygrométrie relative et à la pression de 101 325 Pa.
Dans ce cas de simplification extrême, la masse volumique de l'air est alors considérée comme constante et la vitesse réelle est alors simplifiée de la manière suivante à partir de la loi des gaz parfaits :

$$\rho = \frac{P}{r \cdot (\theta + 273{,}15)}$$

avec :
ρ = masse volumique de l'air à la température et à la pression considérée (kg/m^3).
P = pression atmosphérique en Pa.
r = constante spécifique de l'air sec 287,058 J/kg.K.
θ = température de l'air en °C.

En considérant ces hypothèses simplificatrices (air à 20 °C et 0 % d'hygrométrie, et sous 101 325 Pa), on obtient une masse volumique de l'air égale à 1,204 kg/m^3.
La vitesse est alors calculée selon l'équation simplifiée suivante :

$$V = \sqrt{\frac{2.\Delta P}{\rho}} = \sqrt{\frac{2}{1{,}204}}\sqrt{\Delta P} = \underline{1{,}289\sqrt{\Delta P}}$$

Si on intègre le coefficient d'étalonnage α propre au tube de Pitot, généralement 1.0015 (cf. la norme NF X 10-112, annexe A, à ce sujet), l'équation simplifiée est la suivante :

$$V = \alpha.\sqrt{\frac{2.\Delta P}{\rho}} = 1{,}291\sqrt{\Delta P}$$

C'est cette équation qui est parfois prise en compte comme constante pour calculer la vitesse de l'air avec un tube de Pitot.
Ce résultat est indicatif mais généralement insuffisant en terme de précision pour une installation de climatisation véhiculant de l'air à des températures variant de températures négatives à plus de 40 °C parfois et sous des pressions différentes de la pression atmosphériques.
Si l'on souhaite un résultat un peu plus précis, il est donc indispensable de considérer la température réelle de l'air et la pression de fonctionnement pour pouvoir déterminer sa masse volumique exacte selon l'équation des gaz parfaits vue précédemment :

$$\rho = \frac{P}{r.(\theta + 273{,}15)}$$

Pour une température et une pression quelconques, on obtient alors l'équation suivante :

$$\sqrt{\frac{2.\Delta P}{\rho}} = \sqrt{\frac{2.r.(\theta + 273{,}15)}{P}}\sqrt{\Delta P} = \sqrt{\frac{2.(287{,}058).(\theta + 273{,}15}{P}}$$

$$\Rightarrow V = \sqrt{\frac{574{,}11.\theta + 156\ 820}{P}}\sqrt{\Delta P}$$

À titre de comparaison, on peut constater les différents résultats obtenus par une centrale de traitement d'air « tout air neuf » prenant l'air à l'extérieur à 0 °C et le soufflant à 30 °C, et une pression dynamique de 50 Pa :

– avec les conditions de soufflage de l'air à 30 °C et 101 325 Pa, $\rho_{air\ soufflé} = 1{,}164$ kg/m^3 ⇒ vitesse = 9,27 m/s.
– avec les conditions extérieures de l'air à 0 °C et 101 325 Pa, $\rho_{air\ extérieur} = 1{,}292$ kg/m^3 ⇒ vitesse = 8,80 m/s.
– avec les conditions « normales » de l'air à 20 °C et 101 325 Pa, $\rho_{air\ théorique} = 1{,}204$ kg/m^3 ⇒ vitesse = 8,51 m/s.

On note la différence de masse volumique entre l'air extérieur et l'air en sortie de batterie chaude.

L'écart entre la vitesse calculée en considérant l'air arbitrairement à 20 °C alors qu'il est en réalité à 30 °C entraîne une sous-estimation de la vitesse, donc du débit volumique, de plus de 8 % pour seulement 10K d'écart. Cette différence peut avoir des conséquences sur le dimensionnement des réseaux, sur les performances des matériels et sur la puissance acoustique des équipements.

Devant ce problème, quelques constructeurs commercialisent des tubes de Pitot jumelés à des thermocouples permettant ainsi d'intégrer directement la température réelle de l'air dans le calcul du débit. (voir doc. Kimo « tube de Pitot type L et S avec sonde thermocouple »). Cela permet de connaître le débit volumique à la température réelle, et non à la température conventionnelle de 20 °C si on le souhaite.

Il faut donc être vigilant lorsque l'on mesure le débit d'un gaz car sa température influe beaucoup sur le résultat. Si cette mesure doit être comparée à une valeur contractuelle, par exemple lors des opérations de réception d'une installation de climatisation, il y a lieu de se faire préciser les conditions « normales » dans lesquelles doivent être exprimés les résultats.

À titre indicatif, le débit minimal d'air neuf par occupant à introduire dans les locaux à pollution non spécifique est exprimé en litre/seconde d'air à 1,2 kg/m^3, comme précisé à l'article 64 du Règlement Sanitaire Départemental Type.

Par contre, la pression réelle de l'air et son hygrométrie ne sont toujours pas prises en compte. Ceci s'explique par la difficulté à fabriquer un tube de Pitot intégrant simultanément le mesurage de ces paramètres.

En toute rigueur, pour pouvoir appliquer le théorème de Bernouilli et utiliser l'équation $V = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$, il serait nécessaire de calculer la masse volumique réelle de l'air.

En annexe 3.2, il est décrit deux méthodes de détermination de la masse volumique de l'air :

– par calcul : $\rho = \frac{p}{287 \cdot T} - 1{,}32.10^{-5}\frac{\varphi \cdot p_{vs}}{T}$.
– par lecture sur un diagramme.

À titre de comparaison avec les résultats obtenus précédemment avec de l'air à 30 °C, les résultats sont (voir calculs détaillés en annexe 3.2) :

– par calcul : ⇒ $\rho \approx 1{,}155$ kg/m^3 ;

– par lecture : $\Rightarrow \rho \approx 1{,}155$ kg/m^3 (à la précision de lecture près).

Nota

Par rapport à l'utilisation des conditions normales de température et de pression ($\rho_{air\ théorique} = 1{,}204$ kg/m^3), l'écart est donc de 4 %.

La vitesse calculée avec $V = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$ serait de 9,30 m/s au lieu de 8,51 m/s, ce qui engendre un écart de 9 %.

Nota

Par rapport à l'utilisation des conditions approximatives de l'air (30 °C sous 101 325 Pa), l'écart sur la masse volumique 1.164 kg/m^3, soit moins de 1 %.

La vitesse calculée avec $V = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$ serait de 9,30 m/s au lieu de 9,27 m/s, ce qui engendre un écart inférieur à 1 %.

Conclusion : À la vue des différents résultats obtenus en fonction des paramètres considérés ou mesurés, le matériel minimum à utiliser pour déterminer au plus près la vitesse de l'air dans un conduit à l'aide d'un tube de Pitot est son utilisation avec un anémomètre électronique jumelé avec une sonde thermocouple.

On trouvera en annexe, les tableaux des coefficients correctifs K à utiliser lorsque les conditions de mesurage diffèrent des conditions normales de température et de pression appliquées en France (0 °C/101 325 Pa et 20 °C/101 325 Pa), et de celles appliquées en Allemagne (22 °C/101 325 Pa (références PTB (Physikalische Technische Bundesanstalt)/DKL (Deutscher Kalibrierdienst Laboratories)).

Une meilleure précision sera toutefois obtenue en intégrant aussi la masse volumique réelle de l'air en fonction de son hygrométrie et de sa pression dans l'équation de Bernouilli.

1.2 L'anémomètre à fil chaud

L'anémomètre à fil chaud est constitué d'un élément sensible que l'on introduit dans la veine d'air, ou que l'on utilise directement dans l'air ambiant à proximité d'un diffuseur par exemple, pour déterminer la vitesse de circulation du flux, seul ou jumelé avec un cône étalonné.

Il est couramment utilisé en génie climatique en raison de sa plage de fonctionnement pouvant se situer entre 0,15 m/s à 30 m/s et de sa réponse rapide.

Les principales contraintes sont de respecter une température de flux de 80 °C maximum et une propreté de l'air afin ne pas endommager l'élément sensible. De même, la fragilité de ce dernier nécessite le plus grand soin lors des manipulations.

Il est à noter que l'appellation « fil chaud » est aujourd'hui impropre parce que ce procédé de mesure est basé sur l'utilisation d'une thermistance en lieu et place du fil originel.



Figure 1.8 – Exemple de « fil chaud »



1.2.1 Principe de fonctionnement

La mesure de vitesse à partir d'un anémomètre à fil chaud, ou encore appelé anémomètre thermique ou thermo-anémomètre, est basé sur la variation de la conduction thermique transmise par la thermistance (le « fil chaud ») plongé dans un écoulement. La puissance électrique fournie au conducteur pour le maintenir à température d'équilibre T_f est proportionnelle à l'écart de température entre le conducteur et le fluide à T_o, température de référence à mesurer.

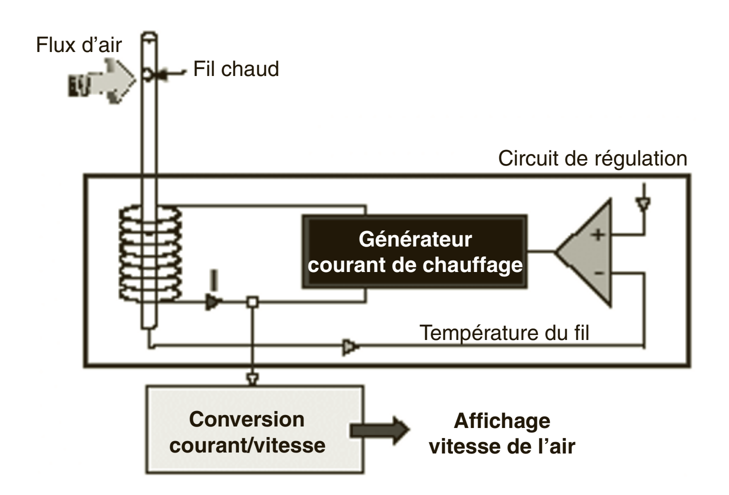


Figure 1.9 – Fonctionnement d'un « fil chaud »

La quantité de chaleur fournie est fonction des propriétés physiques et de la géométrie du conducteur, des transferts de chaleur par rayonnement, par conduction vers les supports, par convection libre et par convection forcée due à la vitesse relative du fluide mais aussi des propriétés physiques du fluide et de sa vitesse d'écoulement.

En supposant des échanges thermiques purement convectifs et certaines hypothèses concernant la physique de ces échanges, L.V. KING a été le premier au début du

XXe siècle à proposer une loi générale représentant la puissance électrique fournie au fil à l'équilibre en fonction de la vitesse sous forme :

$$\frac{rI^2}{r - r_0} = A + BU^n$$

avec :
r = résistance électrique du fil à la température d'équilibre T_f
r_0 = résistance électrique du fil à la température de référence T_0.
I = courant qui parcourt le fil.
U = vitesse du fluide.
n = 0,5 par expérimentation (selon L.V. King).
A = constante qui dépend des propriétés physiques du fluide.
B = constante qui dépend des propriétés physiques du fluide.

La relation qui lie r, r_0, T_f et T_0 est de la forme :

$$r = r_0[1 + \alpha(T_f - T_0)]$$

avec :
α = coefficient de température du matériau résistif constituant le fil (à ne pas confondre avec le coefficient d'étalonnage du tube de Pitot.

La principale limite que l'on peut remarquer dans l'utilisation du fil chaud habituellement utilisé en génie climatique réside dans l'unidirectionnalité de la mesure.
Il existe, mais très peu utilisé dans ce domaine, des fils chauds bi, tri, voire omnidirectionnel d'un coût très élevé (l'élément sensible est un film déposé sur une sphère de petit diamètre) mais capable de mesurer la vitesse d'un écoulement dont on ne connaît pas la direction.
De même, le principal inconvénient de la sonde à fil chaud est sa relative fragilité : la résistance mécanique du fil de 2,5 µm de diamètre et d'environ 2,5 à 5 mm de long est particulièrement faible et la sonde ne résiste pas beaucoup à l'impact de poussières ni aux manipulations indélicates de l'opérateur.
Le fil chaud à résistance de platine est surtout utilisé dans la plage de température de 10 °C à 40 °C.

1.2.2 Principes de mesurage

Placé parallèlement à la direction de l'écoulement, la vitesse de l'air refroidi l'élément sensible dit le « fil chaud ». Le moindre écart angulaire fait dériver le mesurage. On peut négliger l'erreur jusqu'à 3 degrés d'angle. Au-delà, il convient de refaire le mesurage (cf. chapitre « Rappels de métrologie »).
Un repère sur le corps, généralement télescopique, permet de repérer la position à respecter.



Figure 1.10 – Exemple de mesure en gaine

Lors d'un mesurage sur une grille, on peut pallier la difficulté inhérente au champ de vitesse très hétérogène en utilisant un cône de mesure qui présente l'avantage de maîtriser le positionnement l'élément sensible du fil chaud et aussi de canaliser tout le flux.
Il en existe de plusieurs formes de cônes :



Figure 1.11 – exemple de mesure sur bouche murale avec cône (doc. KIMO)





Figure 1.12 – exemple de formes de cônes (doc. KIMO)

Dans le cas de diffuseur à induction, le mesurage au niveau des ailettes est faussé par les phénomènes de re-circulation d'air. L'utilisation d'un cône pour les bouches de petites dimension ou d'un balomètre pour les diffuseurs de grande taille est alors indispensable (voir chapitre spécifique).
Les cônes de mesure de débit d'air sont conçus par les fabricants d'appareil de mesure d'une manière expérimentale. Un coefficient propre à chaque modèle de cône permet de déterminer le débit d'air en fonction de la vitesse mesurée.

Exemple

Le cône type K75 a un coefficient k de 50. Pour une vitesse de 12 m/s, le débit correspondant est de 600 m^3/h.

Si la grille de soufflage ou la bouche ne se prête pas à l'utilisation d'un cône de mesure de par sa dimension, il est alors nécessaire de procéder à un mesurage sur le diffuseur lui-même.
Aucune méthode normalisée n'est en vigueur à ce jour pour les anémomètres à ailettes, ce qui laisse beaucoup d'interprétations sur les résultats des mesurages. Les sources d'erreurs sont multiples et la précision en est affectée.
Se reporter au chapitre 2, les différents types de mesure de débits.
Un inconvénient de l'anémomètre à fil chaud est qu'il ne confirme pas le sens du flux. Cela peut poser un problème si le diffuseur est inaccessible par le technicien, ce qui rend impossible la vérification de sens de circulation de l'air. Dans le doute, on peut faire un contrôle préalable avec un tube de Pitot qui, lui, est sensible au sens de circulation de l'air.



L'utilisation d'un anémomètre à fil chaud mis en place dans un cône de grande dimension permet de faire une lecture directe du débit. Un cône de 300 × 300 en fibre de verre et de très faible perte de charge canalise l'air jusqu'au fil chaud réparti sur toute la surface.

Figure 1.13 – Cône à fil chaud (doc. KIMO)

1.3 L'anémomètre à effet Vortex

Lorsqu'un corps est immergé dans un fluide en mouvement, il se produit des tourbillons dans son sillage. Ces mouvements sont appelés « tourbillons de Von Karman » ou « effet Vortex » (Vortex signifie tourbillon en anglais). La fréquence de détachement des tourbillons est proportionnelle à la vitesse de circulation.

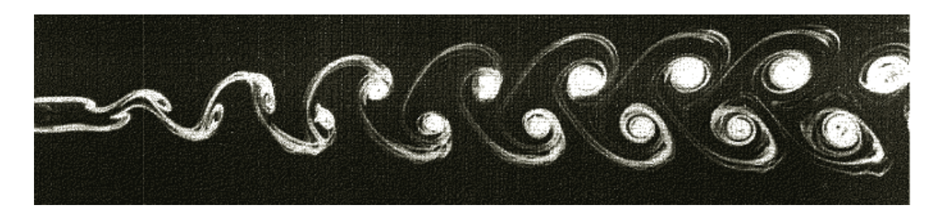
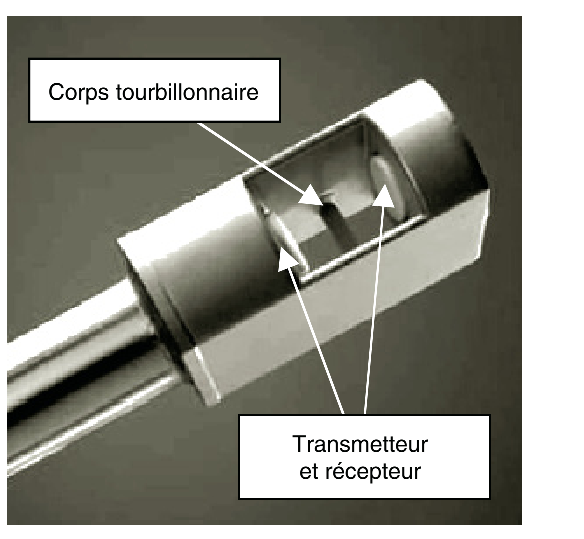


Figure 1.14 – Tourbillons de Von Karman (Doc. ONERA)

Cet anémomètre présente l'avantage de permettre des mesurages indépendants de la nature du gaz dans lequel est immergée la sonde, de sa densité, de la pression.
Les capteurs à effet Vortex n'ont pas d'éléments en mouvements, ce qui évite son usure. Ils sont réalisés en matériaux résistant à la corrosion et peuvent être utilisés dans tout type de gaz tels que l'air, le méthane, le gaz naturel, le monoxyde de carbone, l'ammoniac, l'argon, vapeur…
Ils sont construits généralement en acier inoxydable, en titane ou en hastelloy supportent les gaz chargés en solides, voire en fibres. Le canal de mesure peut être nettoyé avec un petit pinceau et/ou un agent détergent qui sèche sans laisser de résidus.



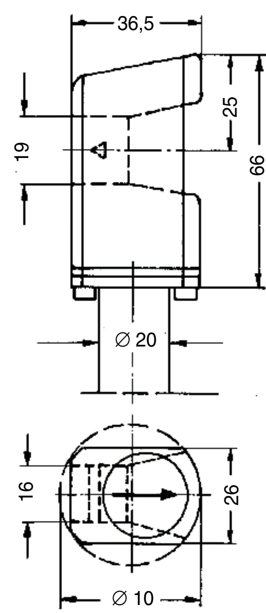


Figure 1.15 – Détails d'un capteur d'anémomètre à effet Vortex (d'après doc. TH industrie)

Par contre, le capteur est très sensible aux gouttelettes d'eau qui risquent de perturber le mesurage. L'humidité dans les gaz n'a pas d'influence sur la mesure tant qu'il n'y a pas de condensation sur le corps tourbillonnaire. Cette influence peut être limitée si le corps tourbillonnaire est en position verticale afin de faciliter son drainage, et surtout s'il est de forme cylindrique.

Ce type de capteur a une plage de fonctionnement de 0,5 à 40 m/s avec une bonne répétabilité car non soumis à l'inertie, et supporte une ambiance de –25 °C à 240 °C selon le modèle.

L'incertitude de mesure est de ± 0,3 m/s jusqu'à 5 m/s et de ± 0,8 % au-delà.

De part sa conception, l'anémomètre est sensible aux vibrations externes. Une attention particulière doit être apportée au mode de fixation du capteur si l'on souhaite le solidariser sur le conduit dans lequel a lieu le mesurage.

De même, le capteur ne doit pas être à proximité d'une source électromagnétique d'interférence, ni à moins de 10 cm d'un autre capteur à effet Vortex dans le même plan et moins d'1 m dans le sens de l'écoulement.

1.3.1 Principe de fonctionnement

Dans le cas de l'anémomètre à effet Vortex, les tourbillons sont détectés par ultrasons qui sont émis entre un émetteur et un récepteur d'ultrasons. Lorsqu'un fluide passe sur un corps perturbateur, des tourbillons se forment sur les côtés et se détachent sous l'effet de l'écoulement d'une manière plus ou moins sensible selon le nombre de Reynolds *Re*.



Figure 1.16 – Représentation des allées de Von Karman en fonction de *Re*.
avec : a : *Re* = 32. — b : *Re* = 50. — c : *Re* = 70.

Le nombre de Strouhal S_t est un nombre sans dimension décrivant les mécanismes de circulation oscillante :

$$S_t = \frac{f \cdot d}{v}$$

avec :
f = fréquence détachement des tourbillons en Hz
d = diamètre de l'élément perturbateur, en m
v = vitesse de l'écoulement, en m/s
On peut en déduire :

$$v = \frac{f \cdot d}{S_t}$$

On peut remarquer sur le graphe suivant que S_t est quasi indépendant du nombre de Reynolds après la valeur 10 000 :

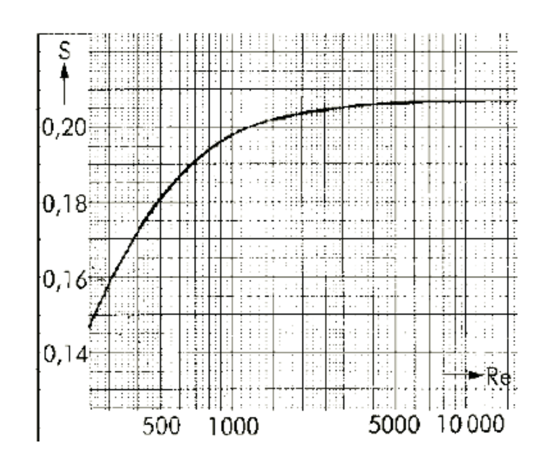


Figure 1.17 – Valeur du nombre de Strouhal en fonction du nombre de Reynolds

Selon le type de capteur, les fréquences typiques de détachement sont :

– 63 Hz → 1 m/s.
– 1 450 Hz → 20 m/s.
– 2 100 Hz → 40 m/s.

1.3.2 Principe de mesurage

L'exploration du champ de vitesse se fait comme lors de l'utilisation d'un moyen de mesurage intrusif, tels qu'un tube de Pitot ou qu'un anémomètre à fil chaud. La répartition des points de mesurage est indiquée au chapitre 2 de la présente partie « les différentes méthodes de mesurage d'un débit ».

Le champ de vitesse à explorer doit être situé à au moins 20 diamètres en aval et à 10 diamètres en amont de toute singularité.

Comme pour tout élément introduit dans la veine d'air, la position intrinsèque du capteur par rapport à l'axe de la conduite revêt une importance capitale. En fonction de sa position, la précision du mesurage peut en être affectée. Les deux graphes ci-dessous indiquent l'influence sur la valeur mesurée en fonction du décalage angulaire α par rapport à l'horizontale, et en fonction du décalage angulaire β par rapport à la verticale. On peut constater que la valeur mesurée peut être erronée de ± 20 %.

Compte tenu de la dimension de la sonde pouvant atteindre 40 mm de diamètre, il est conseillé d'utiliser ce type d'anémomètre que dans des conduites de diamètre supérieur à 700 mm pour un mesurage dans l'axe ou de diamètre supérieur à 2 m pour un mesurage au point de vitesse débitante, ou de diamètres hydrauliques équivalents.

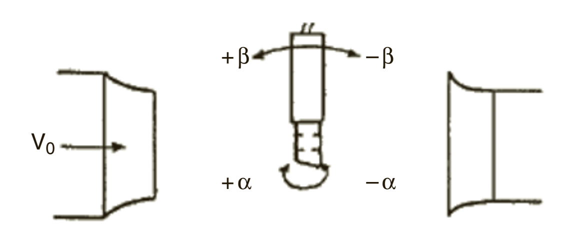


Figure 1.18 – Définition des angles
(Doc. TH industrie)

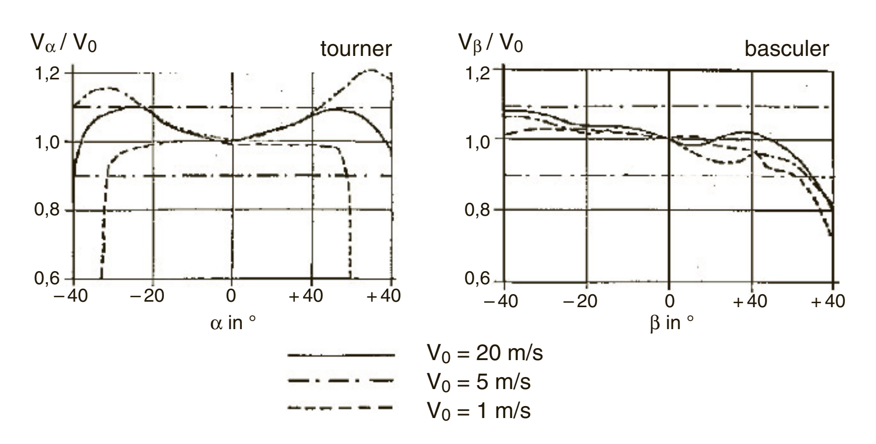


Figure 1.19 – Influence des écarts angulaires α et β sur la valeur de la vitesse
(doc. TH industrie)

1.4 L'anémomètre à ailettes (ou à hélice)

L'anémomètre à ailettes est couramment utilisé pour mesurer les débits d'air en sorties de grille de ventilation, de grille de désenfumage et à l'aspiration de bouches de VMC. Ajusté sur un cône de mesure ou en « balayage » manuel sur une surface, l'anémomètre à ailettes a été l'un des premiers types d'appareil de mesure pour déterminer un débit. L'avènement des anémomètres à fil chaud l'a un peu évincé mais son utilité perdure car il prend en compte une grande surface de mesure simultanément.

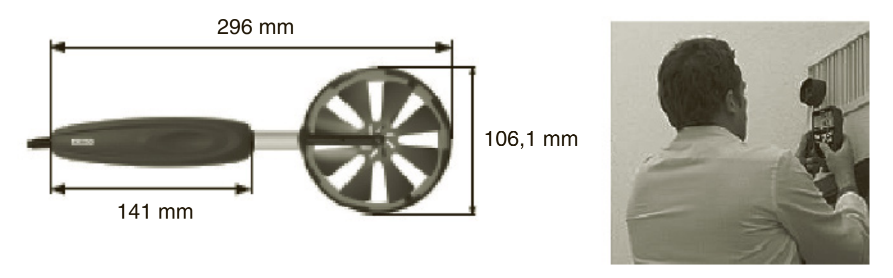


Figure 1.20 – Anémomètre à hélice et sa manipulation (doc. KIMO)

Il existe des anémomètres avec des hélices de diamètre 11 mm, 14 mm, 16 mm, 22 mm, 70 mm, 80 mm et 100 mm.
L'anémomètre est parfois utilisé pour effectuer des mesurages en gaine mais dans ce cas, le rapport du diamètre de l'hélice au diamètre intérieur de la conduite ne doit pas dépasser 0,11.

1.4.1 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement repose sur la rotation d'un axe équipé d'ailettes qui tournent dans une buse cylindrique (appelé aussi manchon) traversé par le flux d'air.
L'acquisition des rotations de l'axe s'effectue par capteur à effet Hall.

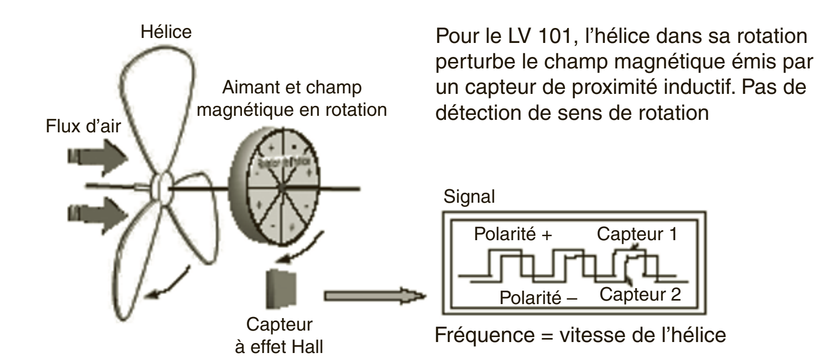


Figure 1.21 – Schématisation du fonctionnement d'un anémomètre à hélice (Doc. KIMO)

Certains constructeurs limitent des phénomènes de frottement, qui peuvent se révéler relativement importants à petite vitesse, par des roulements au diamant.
Afin de limiter l'inertie des ailettes, elles sont généralement fabriquées en aluminium.

1.4.2 Principe de mesurage

L'axe de l'anémomètre placé parallèlement à la direction de l'écoulement, la vitesse de l'air fait tourner les ailettes.

Pour pouvoir déterminer le débit directement en fonction de la condition normale de température (20 °C), il est préférable d'utiliser un anémomètre équipé d'une sonde de température intégrée. Dans ce cas, il faut simplement veiller à placer la sonde face au flux d'air. Une flèche sur la buse permet de repérer le sens de l'air à respecter.

Attention, le moindre écart angulaire fait dériver le mesurage. Pour palier cet inconvénient, on peut utiliser un cône qui présente l'avantage de pourvoir être plaqué sur la grille de ventilation.



Figure 1.22 – Un anémomètre à hélice et son cône d'adaptation (Doc. KIMO)

Enfin, dans le cas de diffuseur à induction, le mesurage est faussé par les phénomènes de re-circulation d'air. L'utilisation d'un cône pour les bouches de petites dimensions ou d'un balomètre pour les diffuseurs de grande taille est alors indispensable (voir le chapitre spécifique).

Les cônes de mesure de débit d'air sont conçus par les fabricants d'appareil de mesure d'une manière expérimentale. Un coefficient *k* propre à chaque modèle de cône permet de déterminer le débit d'air en fonction de la vitesse mesurée.

> **Exemple**
>
> Le cône type K75 a un coefficient *k* de 50. Pour une vitesse de 12 m/s, le débit correspondant est de 600 m^3/h.

En première approche et en absence de documentation technique du constructeur, il est possible d'estimer la valeur de *k*, celui-ci dépendant principalement du rapport des sections du cône de mesure. Cette « astuce » pratique est permise compte tenu des très faibles pertes de charge que créé le cône, mais rien ne vaut la détermination précise du constructeur issue d'un banc d'essais certifiés COFRAC.

Si la grille de soufflage ou la bouche ne se prête pas à l'utilisation d'un cône de mesure de par sa dimension, il est alors nécessaire de procéder à un mesurage sur le diffuseur lui-même.

Aucune méthode normalisée n'est en vigueur à ce jour pour les anémomètres à ailettes, ce qui laisse beaucoup d'interprétations sur les résultats des mesurages. Les sources d'erreurs sont multiples et la précision en est affectée.
Se reporter au chapitre spécifique sur les mesures sur grilles pour les méthodes de mesure à envisager selon les cas.
Un autre inconvénient de cet appareil de mesure de vitesse d'air, tout comme l'anémomètre, est qu'il ne confirme pas le sens du flux. Cela peut poser un problème si le diffuseur est inaccessible par le technicien car cette position rend impossible la vérification de sens de circulation de l'air (comme on pourrait le faire simplement en apposant une feuille de papier sur la grille). Dans le doute, on doit faire un contrôle préalable avec un tube de Pitot qui, lui, est sensible au sens de circulation.

1.5 Le balomètre

Certains constructeurs commercialisent un débitmètre avec cône adaptable de grande dimension. Couramment utilisé pendant les campagnes d'équilibrage des installations de génie climatique, cet appareil de mesure présente l'avantage d'être compatible avec les grandes grilles de soufflage ou d'aspiration, de forme carrée, rectangulaire et circulaire. De même, il convient aux diffuseurs qui créent un effet d'induction au col de soufflage.
Les hottes en matériau synthétique renforcées par un système de tringlerie permettent de canaliser l'air jusqu'à l'embase où se situe les équipements de mesure.

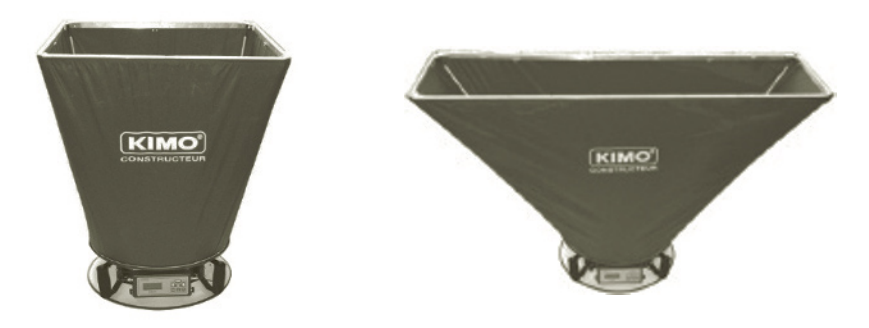


Figure 1.23 – Balomètre et sa hotte transformable (Doc. KIMO)

N'étant pas réputé pour sa grande précision (± 5 % de la lecture) mais plutôt pour la bonne répétabilité des mesurages, car il ne dépendent ni de la vitesse de balayage de l'opérateur, ni de la position de la sonde, ni de la section de mesure, le balomètre est très utilisé pendant les **campagnes d'équilibrage aéraulique**.
Le metteur au point détermine le débit de quelques diffuseurs en effectuant des mesurages précis directement dans les gaines rectilignes en amont de ceux-ci, et compare systématiquement ces mesures avec la lecture effectuée au balomètre. Il en déduit le coefficient de transformation k des débits mesurés au balomètre par rapport à ceux réalisés en gaines, et peut ainsi procéder à des campagnes de mesurage plus facilement et avec une bonne précision.

De fait, il est préférable de déterminer un coefficient *k* par réseau aéraulique et a fortiori par installation aéraulique (par zone, par étage, par centrale de traitement d'air ou par extracteur par exemple), afin de prendre en compte les pressions différentes dans les gaines.
Le coefficient *k* représente le facteur de pertes de charge du diffuseur, de son plénum de raccordement et éventuellement de son registre de réglage. Lors d'une campagne d'équilibrage, il intègre aussi une partie de celles du réseau.
Cette méthode par comparaison évite notamment d'ouvrir systématiquement tous les faux-plafonds pour effectuer les mesurages sur les gaines de raccordement de chaque diffuseur.

1.5.1 Principe de fonctionnement

L'air est canalisé dans la hotte collectrice de flux ce qui permet de déterminer un débit moyen. La lecture se fait directement sur l'afficheur numérique orientable placé au niveau de l'embase.
Il y a trois techniques de détermination du débit volumique :

- par prises de vitesse et de pression différentielle type « tube de Pitot moyenné » ;
- par prises de vitesse et fil chaud central ;
- par fils chaud directement dans le flux.

Le balomètre peut fonctionner sur des bouches de soufflage et sur des bouches d'aspiration. Le sens de l'air doit être défini avant le mesurage.
Les hottes peuvent avoir plusieurs dimensions (en mm) : 500 × 500, 610 × 610, 700 × 700, 400 × 1 200, 700 × 1 200, 400 × 1 500, 1 000 × 1 000. Se reporter à la notice du constructeur de son choix pour vérifier les possibilités.

1.5.2 Principes de mesurage

■ Balomètre à prises de vitesses et de pression différentielle

L'embase du balomètre est constituée d'une matrice de vitesse en forme de croix (voir documents TSI ci-dessous) qui permet de déterminer la vitesse moyenne du flux par l'intermédiaire d'un micro-manomètre. En connectant la sonde de température ou la sonde de température/humidité, le débit mesuré peut être ramené aux conditions normales de température et de pression (20 °C/101 325 Pa) et aussi connaître la température moyenne du flux d'air.
Sur le modèle présenté (balomètre TSI Accubalance 8375), il est possible de n'utiliser que l'embase de prise de vitesses sans la hotte pour procéder à des mesurages de vitesses en sortie de filtres à air ou sur une grille de rejet de ventilation par exemple.
L'embase existe aussi spécifiquement, sans le capteur d'écoulement d'air, ni la hotte en toile (voir figures au verso).
À toutes fins utiles, il convient de préciser que l'utilisation de cette embase ne correspond pas à la méthode de mesure des vitesses d'air frontales d'une sorbonne qui est décrite dans la norme française NF EN 14175. Se reporter à la méthode de mesurage spécifique aux sorbonnes décrite au chapitre 2 de la présente partie « Aéraulique ».

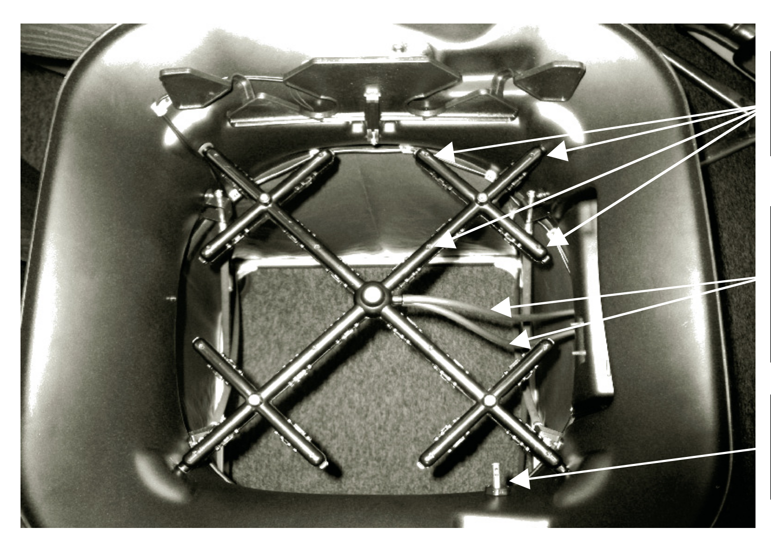


Figure 1.24 – Embase avec matrice de vitesse d'un balomètre TSI 8375 à 16 prises de pression (photo Th.D.)



Figure 1.25 – Balomètre TSI Accubalance 8375 (photos T.S.I. et Th.D.)



Figure 1.26 – Embase TSI DP CALC 8710 (photo T.S.I.)

■ Balomètre à prises de vitesse et fil chaud

L'embase du balomètre est constituée de six branches en étoile percées chacune de 4 trous calibrés de 3 mm. L'air ainsi canalisé abouti au centre de l'embase où un fil chaud compensé en température en déduit la vitesse, puis le débit circulant (même principe que le « fil chaud » décrit au chapitre précédent).
La lecture de la vitesse et du débit compensé en température se fait sur l'afficheur numérique.

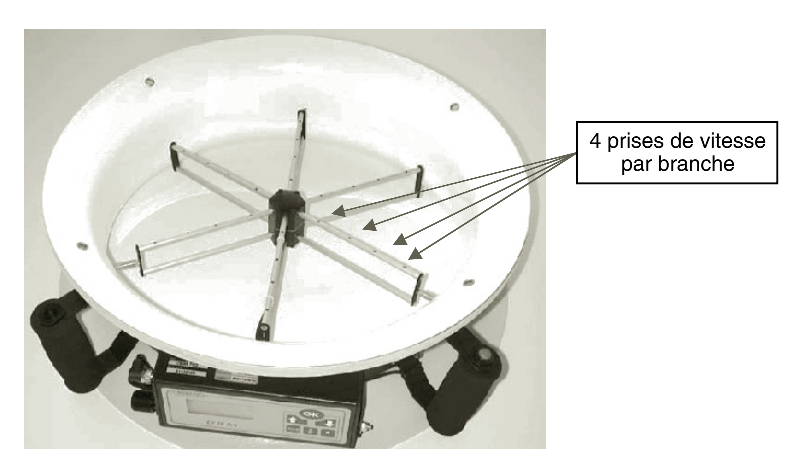


Figure 1.27 – Détails des 24 prises de vitesse en étoile du DBM 700 (Doc. KIMO)

■ Balomètre à fil chaud

L'embase est constituée d'un fil chaud d'environ 1 mètre installé en résille. En plus de la relative imprécision de ce type de mesurage, l'alimentation du fil chaud nécessite une consommation électrique importante sous forme de batteries, lourdes généralement, ou de piles consommables, onéreuses et polluantes. La fragilité du fil chaud (quelques µm de diamètre) ne plaide pas non plus en sa faveur. Pour ces raisons, l'utilisation de ce balomètre tombe en désuétude.



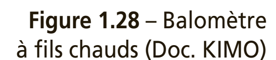


Figure 1.28 – Balomètre à fils chauds (Doc. KIMO)

1.6 Les débitmètres déprimogènes

Il est présenté dans le présent chapitre les deux principaux débitmètres déprimogènes utilisés sur les réseaux aérauliques. D'autres types existent mais sont plutôt destinés aux installations hydrauliques.
Se reporter au chapitre « Hydraulique » du présent ouvrage pour d'autres détails.

1.6.1 Principes de fonctionnement

■ Le diaphragme

Le diaphragme est un appareil déprimogène constitué d'une plaque mince percée d'un orifice circulaire, appelé disque, insérée entre deux brides dans la conduite où circule un fluide en charge et en régime subsonique. La mesure de l'écart de pression statique mesurée de part et d'autre du diaphragme, correspondant à la pression différentielle, permet de connaître sa perte de charge et ainsi de déterminer le débit qui le traverse en fonction de ses caractéristiques de construction normalisées. La conduite doit être complètement remplie dans la section de mesure.

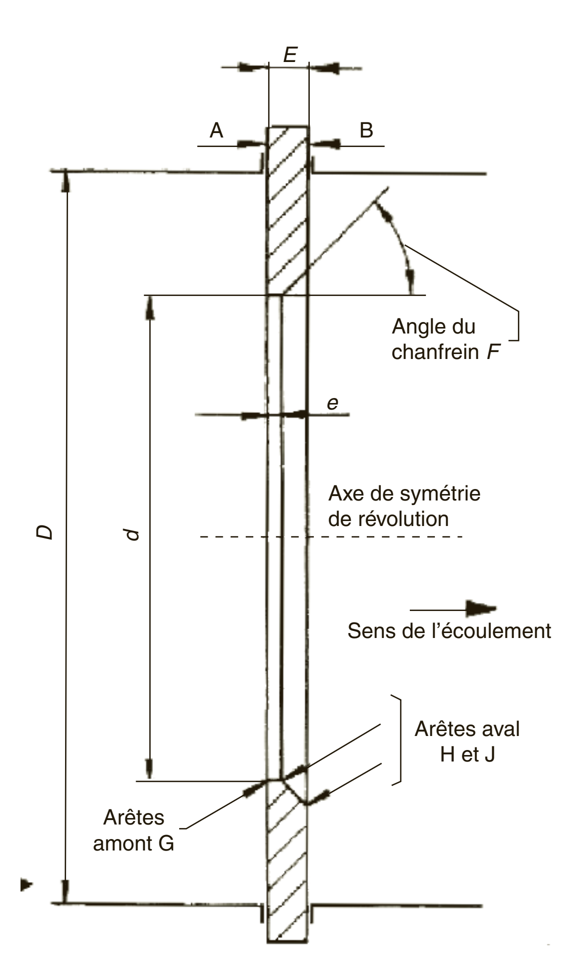


Figure 1.29 – Plaque de diaphragme normalisée (doc. AFNOR)

C'est un appareil de mesurage exclusivement en poste fixe. De part sa fonctionnalité, il n'est pas utilisable en appareil portatif. Les diaphragmes sont prévus dès la construction de l'installation et insérés dans les conduites. Les opérations de mesurage seront réalisées depuis les prises de pression amont et aval extérieures.
Le diaphragme est utilisable indifféremment en présence fluide compressible, comme l'air, ou incompressible, comme l'eau. Dans le domaine du génie climatique, c'est surtout sur les installations hydrauliques que l'on le rencontre. Il conviendra donc de se reporter au chapitre hydraulique où sont expliqués le principe de fonctionnement et le principe de mesurage avec un diaphragme.

■ Le Tube de Venturi

Comme le diaphragme, le tube de Venturi (quelquefois aussi appelé tube de Herschel) est un appareil déprimogène. Il est constitué d'un convergent d'entrée, relié à un col cylindrique qui se poursuit en un divergent. Le fluide est en charge et en régime subsonique dans la conduite. La mesure de l'écart de pression statique mesurée entre le côté amont et le col, correspondant à la pression différentielle, permet de connaître sa perte de charge et ainsi de déterminer le débit qui le traverse en fonction de ses caractéristiques de construction normalisées.
Le fluide peut être soit compressible, soit considéré comme incompressible.

Légende

1 convergent tronconique E
2 col cylindrique C
3 convergent tronconique B
4 col cylindrique ⊕ A
5 plans de raccordement
a 7° ≤ φ ≤ 15°
b Sens de l'écoulement

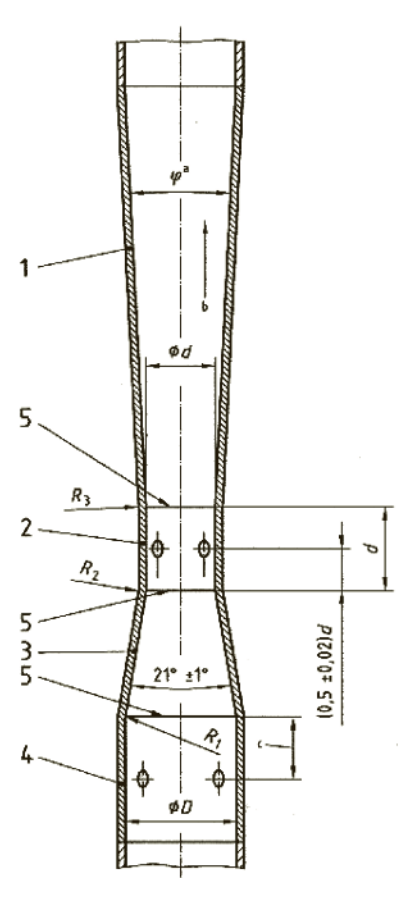


Figure 1.30 – Tube de Venturi (doc. AFNOR)

Le tube de Venturi est utilisable indifféremment en présence fluide compressible, comme l'air, ou incompressible, comme l'eau. Dans le domaine du génie climatique, c'est surtout sur les installations hydrauliques que l'on le rencontre. Il conviendra donc de se reporter au chapitre hydraulique où est expliqué en détail le principe de fonctionnement du tube de Venturi.

2 • LES MÉTHODES DE MESURAGE

Les vitesses d'écoulement n'étant pas uniformes dans une même section de conduite, la détermination de la vitesse moyenne nécessite une étude préalable pour minimiser les erreurs de mesurage et ainsi connaître la vitesse débitante la plus exacte possible. Plus il y a des points de mesurage, meilleure sera la précision. Mais encore faut-il que le nombre et la localisation de ces points soit judicieux en fonction des obstacles amont et aval, comme nous l'avons déjà évoqué dans les chapitres précédents.

Plusieurs méthodes d'exploration des champs de vitesse dans les réseaux aérauliques existent. La répartition des points de mesures a fait l'objet de nombreuses recherches et plusieurs méthodes sont exposées dans les différentes normes qui se sont succédées à ce jour. La mesure pariétale fait l'objet de recherche depuis de très nombreuses années.

Nous exposerons dans ce chapitre la méthode française normalisée, et il est présenté en annexe deux autres méthodes normalisées encore quelquefois employées (méthodes « log-Tchebycheff » et « log-linéaire »).

La première méthode est basée sur une décomposition géométrique du champ de vitesse, alors que celles en annexe sont basées sur des méthodes mathématiques un peu plus difficiles d'approche, notamment pour ce qui concerne la détermination de l'erreur de mesurage.

En synthèse, le tableau 2.1 récapitule les méthodes de calculs de la vitesse débitante décrite dans ces trois méthodes :

Tableau 2.1 – Synthèse des trois méthodes

Méthode	Gaine rectangulaire		Gaine circulaire	
	Localisation des points de mesure	Calcul de la vitesse débitante	Localisation des points de mesure	Calcul de la vitesse débitante
ASHAE/COSTIC/AICVF	centroïdes d'aires égales	moyenne arithmétique	centroïdes d'aires égales	moyenne arithmétique
« log-Tchebycheff »	répartition mathématique	moyenne arithmétique	répartition mathématique	moyenne arithmétique
« log-linéaire »	répartition logarithmique	moyenne pondérée	répartition logarithmique	moyenne arithmétique

La méthode par intégration des champs de vitesse, malgré tout l'intérêt scientifique qu'elle représente, n'est pas reprise dans ce mémento car son utilisation dans le monde du génie climatique de « terrain » est très exceptionnelle.

2.1 Débit dans une gaine rectangulaire

2.1.1 Exploration du champ de vitesse

Exposée notamment dans la norme NF EN 12599 de juillet 2000 relative à la ventilation des bâtiments, cette méthode d'exploration des champs de vitesse est également décrite dans les ouvrages de l'AICVF, du COSTIC et de l'ASHAE.
Elle est basée sur une division de la section d'écoulement en surfaces égales et présente l'avantage de proposer le pourcentage d'erreur probable en fonction de sa distance par rapport à l'obstacle situé en amont. Plus la section sera grande, plus le nombre de points de mesure sera élevé.
Afin de déterminer le nombre de mesurage à effectuer, il faut d'une part considérer l'éloignement par rapport à l'obstacle situé en amont et, d'autre part, apprécier l'incertitude dut à l'appareil de mesure et l'incertitude totale espérée. Plus l'incertitude souhaitée est faible, plus grand sera le nombre de points de mesure.
Le tableau 2.2 indique le nombre de points de mesures selon les hypothèses retenues.

Tableau 2.2 – Nombre de points de mesure requis

Distance relative $L_r = L/D_h$	Incertitude totale/incertitude de l'appareil de mesure		
	10/5	20/5	20/10
1,6	–	15	20
2,0	50	10	14
2,5	34	7	10
3,0	25	6	8
4,0	16	4	5
5,0	12	3	3
6,0	8	2	3

avec :
L = distance séparant la section de mesure à l'obstacle situé en amont.
D_h = diamètre hydraulique de la conduite rectangulaire en régime turbulent.
Calcul du diamètre hydraulique selon la relation de Chesy :

$$D_h = \frac{4S}{P}$$

avec :
S = la section de passage du fluide, en m.
P = le périmètre « mouillé » de la conduite, en m.

Voir la justification de la relation de Chesy en annexe, ainsi que celle émanant de l'ASHRAE pour les flux laminaires.
Maintenant que le nombre de points de mesure est déterminé, il faut les répartir dans la section du conduit selon des surfaces identiques.
Les distances entre la paroi du conduit et le point de mesure sont déterminées par l'équation suivante, dite « méthode triviale » :

$$\frac{y_i}{H} = \frac{x_i}{B} = \frac{2i-1}{2n}$$

avec :
y_i ; x_i = coordonnées du point de mesure.
B = largeur du conduit.
H = hauteur du conduit.
i = nombre ordinal du point de mesure.
n = nombre de point de mesure sur une même droite.

On dit de cette méthode qu'elle est « triviale » car on ne peut pas faire d'hypothèse particulière sur le profil des vitesses.
Pour une section rectangulaire, on obtient les distances relatives suivantes :

Tableau 2.3 – Distance relative des points de mesure par rapport au bord intérieur d'une conduite rectangulaire

Nbre de points de mesure *n* par ligne	Distance relative des points de mesure *i* par rapport à un bord intérieur du conduit rectangulaire (x_i/B ou y_i/H)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,500									
2	0,250	0,750								
3	0,167	0,500	0,833							
4	0,125	0,375	0,625	0,875						
5	0,100	0,300	0,500	0,700	0,900					
6	0,083	0,250	0,417	0,583	0,750	0,917				
7	0,071	0,214	0,357	0,500	0,643	0,786	0,929			
8	0,062	0,187	0,312	0,438	0,563	0,688	0,813	0,938		
9	0,056	0,167	0,278	0,389	0,500	0,611	0,722	0,833	0,944	
10	0,050	0,150	0,250	0,350	0,450	0,550	0,650	0,750	0,850	0,950

Il faut veiller à ce que le point le plus proche de la paroi ne soit pas à moins de 2 cm de celle-ci et que la vitesse ne soit augmentée de plus de 3 % sous l'effet du tube de Pitot ou du fil chaud.
Après avoir procédé au mesurage à chaque point de mesure, la vitesse débitante est déterminée en faisant la moyenne arithmétique de tous les mesurages.

Exemple d'application

Si l'on souhaite connaître le débit dans une section de gaine de ventilation de 0,6 m × 0,8 m située à 3,5 m en aval d'une singularité et en tolérant une incertitude de ± 10 % sur le résultat dont ± 5 % dut par l'appareil de mesure, combien faut-il de points de mesure ?

Il faut d'abord déterminer le diamètre hydraulique D_h correspondant à cette gaine rectangulaire :

$$D_h = \frac{4(0{,}6 \times 0{,}8)}{0{,}6 + 0{,}8} = 0{,}69 \text{ m}$$

La distance relative L_r est égale à :

$$L_r = \frac{L}{D_h} = \frac{3{,}5}{0{,}69} = 5$$

En fonction du tableau 2.3, il faut 12 points de mesure, ceux-ci étant répartis de la façon suivante :

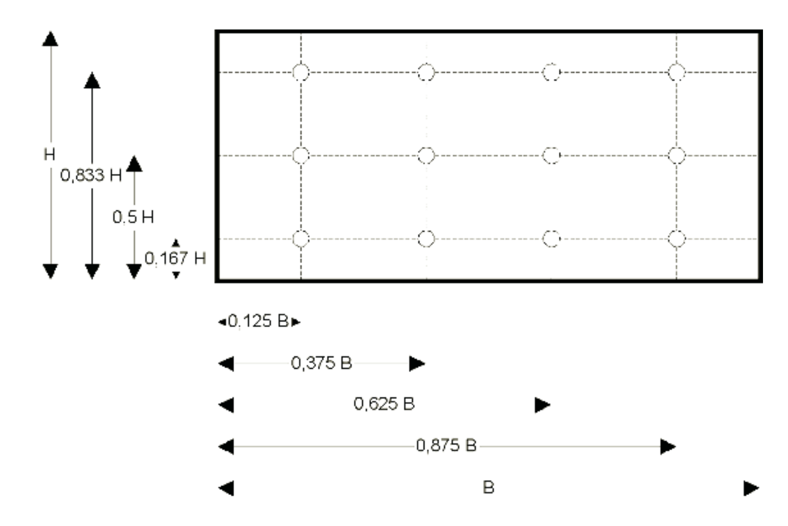


Figure 2.1 – Exemple de répartition des points de mesure d'une gaine rectangulaire (d'après norme NF EN 12599)

La vitesse débitante est égale à la moyenne arithmétique des 12 mesurages.

2.2 Débit dans une gaine circulaire

2.1.1 Exploration du champ de vitesse en plusieurs points

Comme pour la méthode relative aux conduits rectangulaires vue au chapitre précédent, la méthode d'exploration pour les conduits circulaires est exposée dans la norme NF EN 12599 de juillet 2000 relative à la ventilation des bâtiments, et

dans les normes ISO 10780 et NF X 44-052 relatives aux émissions de sources fixes (règle tangentielle).

Elle est basée sur une division de la section d'écoulement en surfaces égales mais celles-ci seront sous formes d'anneaux circulaires concentriques, méthode dite des « centroïdes d'aires égales » (zones hachurées). Notons que le point central ne constitue pas un point de mesure.

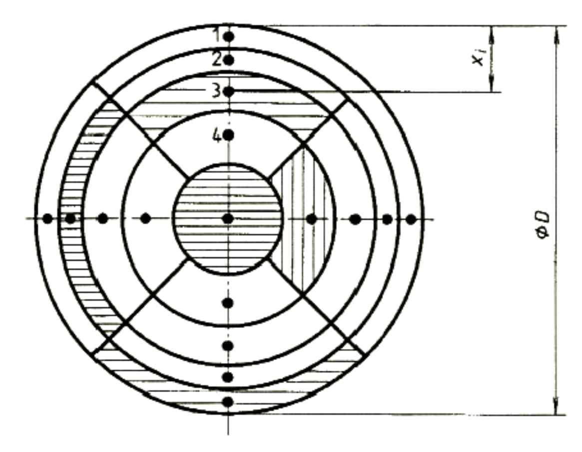


Figure 2.2 – Répartition des points de mesure d'une gaine circulaire (méthode des centroïdes d'aires égales – norme NF EN 12599)

Les distances entre la paroi du conduit et les points de mesure sont déterminées par l'équation suivante, dite « méthode de la ligne des centres de gravité » ou de « centroïdes d'aires égales » :

$$\frac{D}{D_i} = \sqrt{1-\frac{2i-1}{2n}}$$

$$\frac{x_i}{D} = \frac{1}{2}\left(1-\sqrt{1-\frac{2i-1}{2n}}\right)$$

avec :

x_i = coordonnées du point de mesure.

D = diamètre du cercle.

i = nombre ordinal de l'anneau circulaire en partant de l'extérieur.

n = nombre d'anneaux circulaires.

Contrairement à une gaine rectangulaire ou carrée où l'accès à une seule face suffit, il est nécessaire d'avoir accès à deux axes orthogonaux pour positionner les points de mesure d'une gaine circulaire. Les représentations graphiques les représentent généralement répartis sur un axe horizontal et sur un axe vertical, mais rien n'empêche de les positionner en décalant les 2 axes orthogonaux de 45° par exemple.

Pour une section circulaire, on obtient les distances relatives suivantes :

Tableau 2.4 – Distance relative des points de mesure par rapport au bord intérieur d'une conduite circulaire

Nbre de points de mesure *n* par ligne	Distance relative des points de mesure *i* par rapport à un bord intérieur du conduit circulaire (x_i/D)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,1644									
2	0,0670	0,2500								
3	0,0436	0,1464	0,2959							
4	0,0323	0,1047	0,1938	0,3232						
5	0,0257	0,0817	0,1464	0,1161	0,3419					
6	0,0213	0,0670	0,1181	0,1773	0,2500	0,3557				
7	0,0182	0,0568	0,0991	0,1464	0,2012	0,2685	0,3664			
8	0,0159	0,0493	0,8540	0,1250	0,1693	0,2205	0,2835	0,3750		
9	0,0141	0,0436	0,0751	0,1091	0,1464	0,1882	0,2365	0,2959	0,3821	
10	0,0127	0,0390	0,0670	0,0969	0,1292	0,1646	0,2042	0,2500	0,3064	0,3882

Il faut veiller à ce que le point le plus proche de la paroi ne soit pas à moins de 2 cm de celle-ci et que la vitesse ne soit augmentée de plus de 3 % sous l'effet du tube de Pitot ou du fil chaud.
Après avoir procédé au mesurage à chaque point de mesure, la vitesse débitante est déterminée en faisant la moyenne arithmétique de tous les mesurages.
Le nombre de point de mesure est déterminé selon la méthode précédente avec le tableau 2.2, sauf qu'il n'est évidemment plus nécessaire de calculer le diamètre hydraulique.

Exemple d'application

La section de mesure d'une gaine circulaire de diamètre 0,8 m se situe à 4 m d'une singularité. L'incertitude acceptée est de ± 10 %.
La distance relative L_r est égale à :

$$L_r = \frac{L}{D} = \frac{4}{0{,}8} = 5$$

En fonction du tableau 2.2, il faut 12 points de mesure à répartir sur toute la section de mesure, soit 3 par demi-diamètre. Ceux-ci sont répartis sur 3 anneaux de mesure de la façon suivante :

- point 1 à 0,0436 D
- point 2 à 0,1464 D
- point 3 à 0,2959 D
- point 4 à (1-0,2959) D = 0,7041 D

– point 5 à (1-0,1464) D = 0,8536 D
– point 6 à (1-0,0436 D) = 0,9564 D

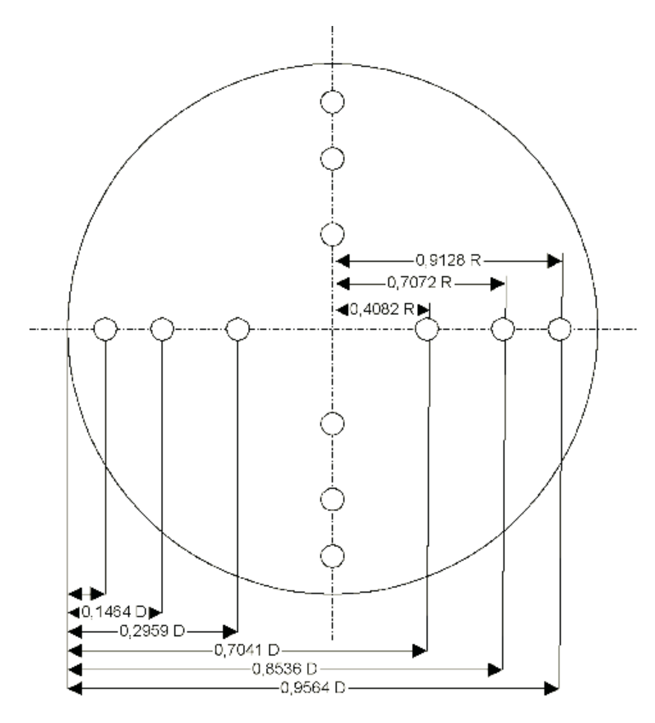


Figure 2.3 – Répartition des points de mesure

La vitesse débitante est égale à la moyenne arithmétique des 12 mesurages.
On trouvera en annexe un développement détaillé sur deux autres méthodes de répartition des points de mesurage : la méthode « log-Tchebycheff » et la méthode « log-linéaire ».
Les positions des points de mesurage obtenus avec ces trois méthodes pour les gaines circulaires sont sensiblement différents :

Tableau 2.5 – Comparaison des points de mesurage avec les trois méthodes pour une gaine circulaire à 6 points de mesure par diamètre (exprimés en partant de la paroi)

	méthode « centroïdes d'aires égales »	méthode « Log-Tchebycheff »	méthode « Log-linéaire »
point 1	0,043 D	0,032 D	0,032 D
point 2	0,146 D	0,137 D	0,135 D
point 3	0,296 D	0,312 D	0,321 D
point 4	0,704 D	0,688 D	0,679 D
point 5	0,853 D	0,863 D	0,865 D
point 6	0,956 D	0,968 D	0,968 D

On remarque que les trois méthodes amènent à des résultats différents sauf pour le point de mesurage qui est le plus proche de la paroi avec les méthodes « Log-Tchebycheff » et « Log-Linéaire ».

2.2.2 Exploration du champ de vitesse en un seul point

Un mesurage unique **dans un conduit circulaire** est parfois suffisant pour approcher une vitesse débitante. La localisation de ce point requiert toutefois une méthodologie précise car il n'est pas question de mesurer n'importe où au « jugé » en pensant détenir la valeur vraie.

Bien réalisé, ce mesurage peut prétendre à une erreur limite de ± 3 % (avec un niveau de confiance de 95 %. Voir le chapitre Métrologie).

Il est alors possible de placer son instrument de mesurage au centre la veine d'air ou à une distance particulière de la paroi de la gaine, en respectant quelques consignes :

– la conduite doit présenter un tronçon amont rectiligne suffisant de manière à ce que l'écoulement soit établi pour que la répartition des vitesses soit invariable au niveau de la section de mesurage. Le tableau 2.6 indique les longueurs minimales à respecter en amont du point de mesure.
– en aval de la section de mesure, la longueur droite doit être au moins égale à cinq diamètres dans tous les cas.

Tableau 2.6 – Longueur droite en amont de la section de mesure

Type de perturbation	Longueur droite en amont minimale (exprimée en multiple du diamètre de la conduite)	
	Mesure sur l'axe de la conduite	Mesure au point de vitesse débitante
coude à 90° ou té	25	50
plusieurs coudes à 90° coplanaires	25	50
plusieurs coudes à 90° non coplanaires	50	80
convergent d'angle total 18° à 36°	10	30
divergent d'angle total 14° à 28°	25	55
vanne papillon grande ouverte	25	45
vanne à opercule ouverte	15	30

Pour ce qui concerne particulièrement le point de mesure de la vitesse débitante :

– L'élément sensible de l'instrument de mesure doit être placé à une distance de la paroi intérieure de la conduite égale à **0,242 *R***[1], avec une tolérance de ± 0,01 *R*.
– Le rapport du diamètre du tube de Pitot, placé au point de vitesse débitante, au diamètre de la gaine ne doit pas dépasser 0,02.
– Le rapport du diamètre de l'anémomètre à hélice, placé au point de vitesse débitante, au diamètre de la gaine ne doit pas dépasser 0,11.

1. Il est à noter que dans les années 1960, cette valeur était de 0,234 (référence Industries Thermiques/MM. Douchez et Cadiergues).

Que ce soit au point de vitesse débitante ou dans l'axe de la conduite, il est très recommandé d'effectuer au moins deux mesures à des endroits différents afin de vérifier la fiabilité du mesurage. Il est tout à fait possible d'effectuer ces deux méthodes de mesurage pour déterminer un coefficient de transformation et vérifier sa constance à d'autres sections de mesures.

2.3 Débit d'une bouche de soufflage

Comme nous l'avons vu au chapitre 1, un mesurage précis sur une grille n'est pas facile à obtenir compte tenu de l'hétérogénéité des champs de vitesse. Qu'elle soit de forme carrée, rectangulaire ou circulaire, un mesurage sur une bouche réalisé à l'aide d'un anémomètre à fil chaud, d'un anémomètre à ailettes ou d'un tube de Pitot, revêt une précision très aléatoire si aucune méthode expérimentale n'est respectée afin de minimiser les incertitudes.
Dans ce contexte, on peut distinguer deux grandes méthodes de mesurage ; la méthode directe et la méthode indirecte :

– la méthode directe est réalisée par un appareil de mesure que l'on déplace, ou que l'on place, devant la grille et qui indique directement la vitesse, voire le débit d'air véhiculé ;
– la méthode indirecte est basée sur une mesure de pression dans le plénum de la bouche, et l'application d'un coefficient k de correspondance « pression-débit » définit par le constructeur de bouche.

2.3.1 Méthodes directes

Trois méthodes de mesurage sont couramment utilisées ;

– en déterminant la vitesse moyenne V_m lors du balayage contre la surface totale S de la grille :

$$Q = V_m \cdot S \text{ (avec } Q \text{ en m}^3\text{/s, } V_m \text{ en m/s et } S \text{ en m}^2\text{)}$$

– en déterminant la vitesse moyenne V_{ks} lors du balayage entre les ailettes de la grille avec un anémomètre de petite dimension type « fil chaud » ou anémomètre à ailettes de petit diamètre (14 ou 16 mm), et en appliquant un coefficient correcteur k_s à la surface totale S :

$$Q = V_{ks} \cdot k_s \cdot S \text{ (avec } Q \text{ en m}^3\text{/s, } V_{ks} \text{ en m/s, } k_s \text{ sans dimension et } S \text{ en m}^2\text{)}$$

– Les coefficients k_s sont donnés par les constructeurs pour tenir compte de la surface libre de passage d'air par rapport à la section nominale. Par défaut, on peut utiliser la valeur 0,7 mais rien ne vaut la valeur exacte du fabricant.
– en déterminant la vitesse moyenne V_p issue de plusieurs points de mesurage contre la surface totale S de la grille :

$$Q = V_p \cdot S \text{ (avec } Q \text{ en m}^3\text{/s, } V_p \text{ en m/s et } S \text{ en m}^2\text{)}$$

En fonction des dimensions de la grille, le tableau ci-dessous indique le nombre de point(s) de mesure à envisager.

A

LES MESURES DE DÉBITS AÉRAULIQUES

Tableau 2.7 – Nombre de point(s) de mesure

Hauteur de la grille (mm)	Largeur grille (en mm)							
	≤ 150		de 150 à 300		de 300 à 460		> 460	
	ligne	colonne	ligne	colonne	ligne	colonne	ligne	colonne
≤ 150	1		1	2	1	3	1	4
de 150 à 300	2	1	2		2	3	2	4
de 300 à 460	3	1	3	2	3		3	4
> 460	4	1	4	2	4	3	4	

Certains constructeurs, comme HESCO-TROX par exemple, communique la valeur du facteur de correction à appliquer au mesurage selon l'inclinaison des ailettes de la grille.

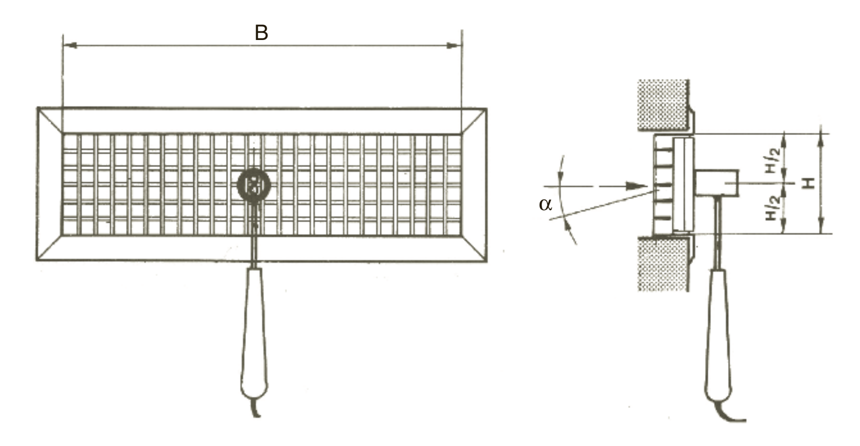


Figure 2.4 – Position de l'anémomètre à hélice sur une grille à double déflexion (Doc. HESCO)

Tableau 2.8 – Facteur de correction f_2 suivant la position des ailettes frontales et des ailettes postérieures dans le cadre de bouche à double déflexion (Doc. HESCO)

Positionnement de lamelles frontales	Facteur de correction f_2 pour un positionnement d'∢ des lamelles postérieures			
	0°	22°	42°	55°
0° parallèle	1,13	1,07	0,98	0,80
44°	1,03	0,93	0,88	0,80
84°	0,89	0,88	0,84	0,73
110°	0,74	0,77	0,76	0,70
140°	0,56	0,62	0,59	0,60
Opposée	0,57	0,55	0,54	0,50

Le débit volumique est calculé selon l'équation suivante :

$$Q = \bar{v}.f_2.S.3\,600.r.\mu$$

avec :
Q = débit volumique, en m^3/h.
$\bar{v}$ = vitesse moyenne, en m/s.
f_2 = facteur de correction du constructeur, selon le positionnement des ailettes.
S = surface nominale de la grille, en m^2.
r = rapport de la section libre sur la section nominale de la grille (< 1).
μ = coefficient de contraction de la veine d'air (égal à 0,98).

2.3.2 Méthodes indirectes

■ Par mesurage de la vitesse

Il est bien évident que la mesure de débit la plus précise serait celle réalisée en amont du diffuseur afin de ne pas être perturbée par la forme du diffuseur ou par les phénomènes d'induction. Malheureusement, les réseaux sont parfois difficilement accessibles dans les faux-plafonds, notamment si ceux-ci sont réalisés en staff ou en placoplâtre, et le seul point de mesurage accessible est le diffuseur lui-même, avec toutes les incertitudes évoquées précédemment.

C'est pourquoi certains constructeurs réalisent des tables de correspondance qui permettent d'évaluer le débit d'air soufflé en fonction des vitesses mesurées à des emplacements précis, indiqués par lui, sur leurs diffuseurs. Cette méthode est très pratique car elle ne nécessite pas de mesurage très compliqué et se fait à des endroits accessibles sur le diffuseur.

Les points de mesurage à réaliser par le metteur au point sont par exemple au milieu de chaque côté du diffuseur, si celui-ci est carré ou rectangulaire, ou sur deux diamètres orthogonaux si le diffuseur est de forme circulaire.

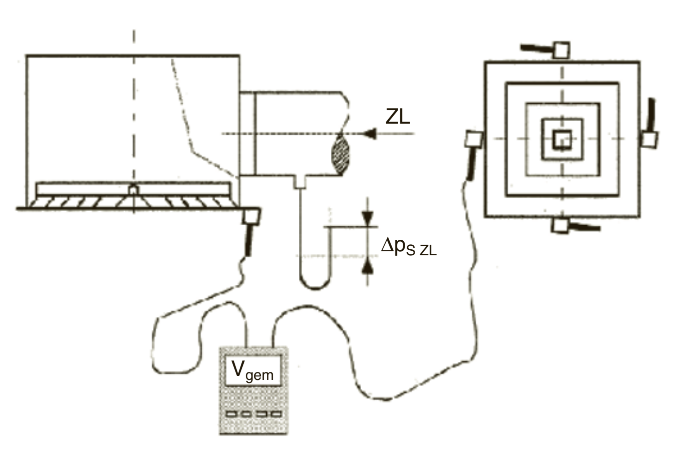


Figure 2.5 – Méthode de mesurage de la vitesse (Doc. TROX)
avec : V_{gem} = vitesse d'air mesurée en sortie. — Δp_s = pression statique en amont.
— ZL = sens du flux (*zuluft* = soufflage).

Les constructeurs préconisent aussi les anémomètres qui correspondent aux essais faits en laboratoire. Il s'agit généralement d'anémomètres à hélices de petit diamètre ou d'anémomètres à fil chaud.
En mesurant la vitesse aux 4 points cardinaux et en faisant la moyenne arithmétique des valeurs, on se reporte sur le tableau 2.9 pour évaluer le débit soufflé.

Tableau 2.9 – Tableau de correspondance « débit-vitesse » (Doc. TROX)

ND	V	150	200	250	300	350	400	500	600	800	1 000	1 200	[m³/h]
	q_v	42	56	69	83	97	111	139	167	222	278	333	[l/s]
200 1 × ⌀ 150	L_{wA}	32	39	45	50	54	57						[dB(A)]
	Δp_s	15	27	44	64	88	116						[Pa]
	V_{gem}	3,2	4,75	6,31	7,87	9,42	11						[m/s]
300 1 × ⌀ 180	L_{wA}		24	31	36	41	45	51	57				[dB(A)]
	Δp_s		6	9	14	19	25	41	60				[Pa]
	V_{gem}		2,25	3,07	3,88	4,69	5,51	7,14	8,76				[m/s]
400 1 × ⌀ 200	L_{wA}			18	24	28	32	38	43	52			[dB(A)]
	Δp_s			3	4	6	8	13	18	33			[Pa]
	V_{gem}			1,8	2,2	2,6	3,0	3,9	4,7	6,3			[m/s]
500 2 × ⌀ 225	L_{wA}					12	16	22	28	36	43	48	[dB(A)]
	Δp_s					3	3	5	8	14	23	34	[Pa]
	V_{gem}					1,5	1,8	2,4	3,0	4,1	5,3	6,4	[m/s]

Par exemple, pour un diffuseur TROX type DDQF raccordé en DN400, une vitesse moyenne de 3 m/s équivaudrait à un débit de 400 m³/h.
L'inexactitude de cette méthode est d'environ ± 5 %.

■ Par mesurage de la pression statique

Les essais réalisés en laboratoire permettent aussi de déterminer la pression statique en amont de la boîte de raccordement de la bouche.
Dans l'exemple précédent, on peut lire que le débit de 400 m³/h correspondrait à une pression statique de 8 Pa.
Certains constructeurs préconisent aussi de mesurer la pression statique directement en amont de la boîte à bouche, ou en faisant passer un tuyau flexible par le diffuseur lui-même pour rejoindre la partie de réseau situé avant le diffuseur.
Dans le tableau 2.10, on peut évaluer un débit de 500 m³/h soufflé lorsque la pression différentielle Δp_{wl} est égale à 25 Pa.
Les utilisateurs ont ainsi deux méthodes pour estimer le débit d'un diffuseur sans faire de mesurages très sophistiqués : en mesurant la vitesse à quatre points de mesures, en mesurant la pression statique dans le réseau et en mesurant la pression différentielle dans le plénum.

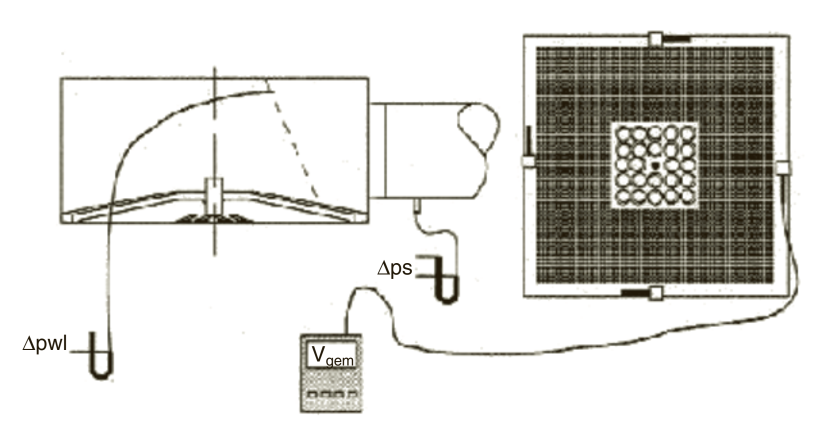


Figure 2.6 – Méthode de mesurage de la vitesse,
de la pression statique et de la pression différentielle
avec : V_{gem} = vitesse d'air mesurée en sortie. — Δp_s = pression statique en amont.
Δp_{wl} = pression différentielle

Tableau 2.10 – Tableau de correspondance « débit-vitesse-pressions » (doc. TROX)

V	250	300	350	400	450	500	550	600	[m³/h]
q_v	69	83	97	111	125	139	153	167	[l/s]
L_{wA}	17	22	27	31	35	39	42	44	[dB(A)]
Δp_3	5	7	10	13	17	21	26	31	[Pa]
Δp_{wi}	6	9	12	16	20	25	30	36	[Pa]
V_{gem}	1,0	1,4	1,7	2,0	2,3	2,6	2,9	3,2	[m/s]

Il est bien évident qu'il faut se référer aux données du constructeur et à la méthode de mesurage qu'il préconise. Ce n'est pas la peine d'inventer des méthodes de mesurage « exotiques » quand les constructeurs font des essais en laboratoire et qu'ils mettent à disposition les résultats de leurs recherches.

Des tableaux de valeurs de référence très complets établis par les constructeurs permettent aussi d'estimer le niveau de pression acoustique corrigé propre à chaque type de diffuseur en fonction de leurs caractéristiques.

2.4 Débit d'une bouche de soufflage à rotules orientables

Ce type de diffuseur ne se prête pas du tout à une mesure directe du débit en raison de la forme des rotules et des bords chanfreinés de celles-ci (voir Figure 2.7).

La méthode indirecte mise au point par la société Trox, entre autres, pour ses produits, est basée sur des essais en laboratoire.

Comme indiqué sur la figure 2.8, la mesure de vitesse se fait simplement sur la rotule située au 1/4 de la longueur et orientée à 0°, c'est-à-dire verticalement, avec un anémomètre à ailettes de la société Schildknecht de diamètre 20 mm.

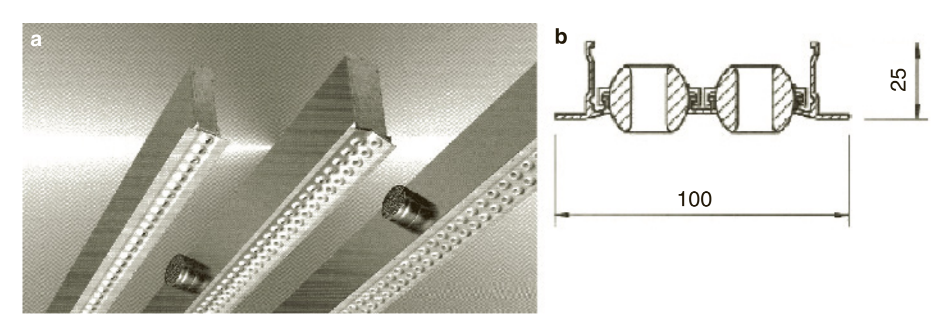


Figure 2.7 – **a.** diffuseurs à rotules (Doc. Trox) ; **b.** rotules Trox KS2 W100

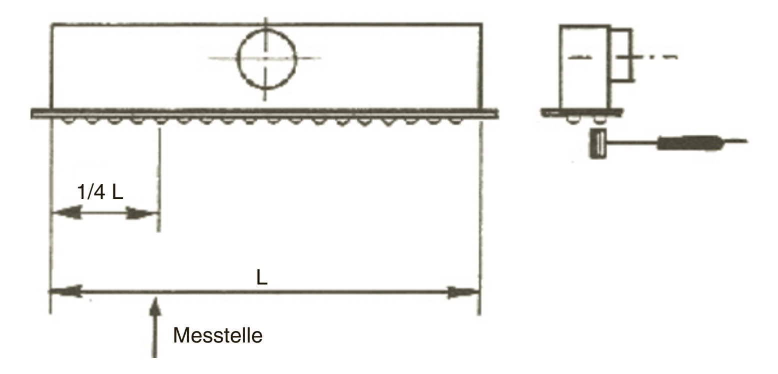


Figure 2.8 – Point de mesure sur diffuseur à rotules (doc. TROX)

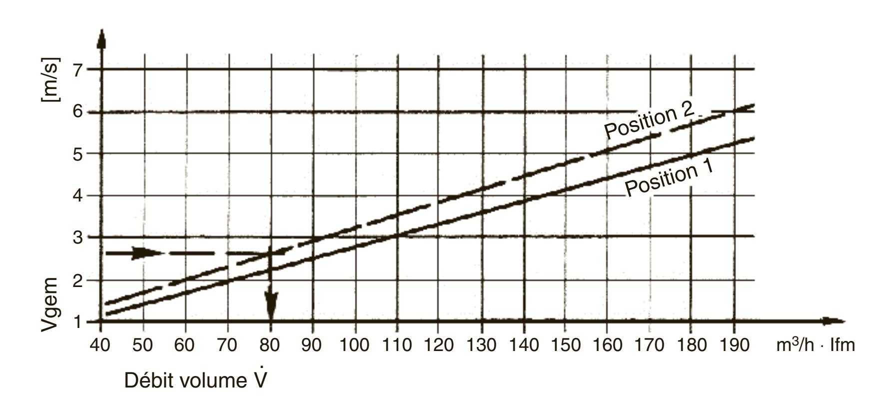


Figure 2.9 – Courbe d'équivalence « vitesse-débit d'air » (doc. TROX)

Exemple

Une vitesse de 2,7 m/s est lue au niveau de la 5e rotule, correspondant au π de la longueur d'un diffuseur de 2 mètres.

Le débit d'air correspondant lue sur l'abaque est de 80 m^3/h.m^{-1} en position 2 (stellung 2) suivant le schéma ci-dessous (qui comprend 8 possibilités différentes, et donc autant de courbes d'équivalence « vitesse-débit d'air » à demander au constructeur).

Le débit total soufflé est de :

$$Q_V = 80 * 2 = 160\ \mathrm{m}^3/h$$

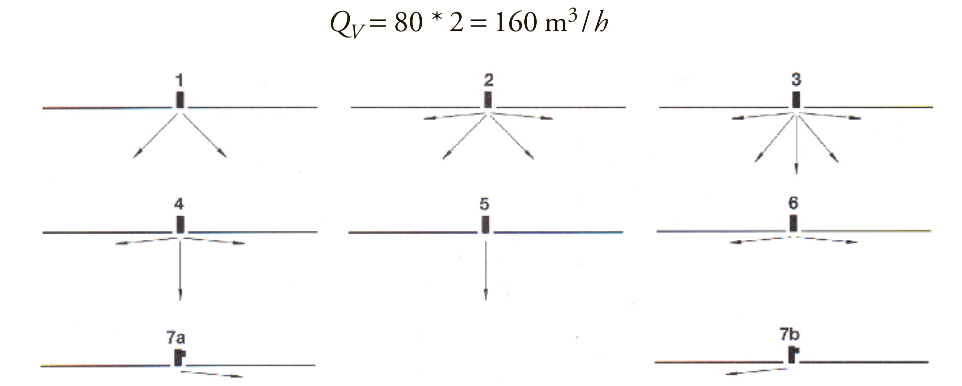


Figure 2.10 – Différents repères de positions de rotules (doc. TROX)

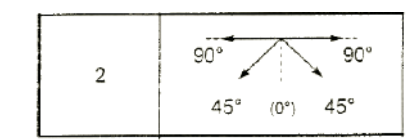


Figure 2.11 – Détails de la position n°2 (doc. TROX)

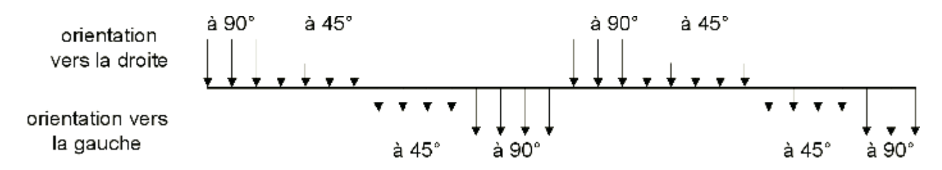


Figure 2.12 – Détails de l'alternance des rotules du cas n°2 (d'après doc. TROX)

Ce type de mesurage peut être jumelé avec la mesure de la pression statique dans le plénum :

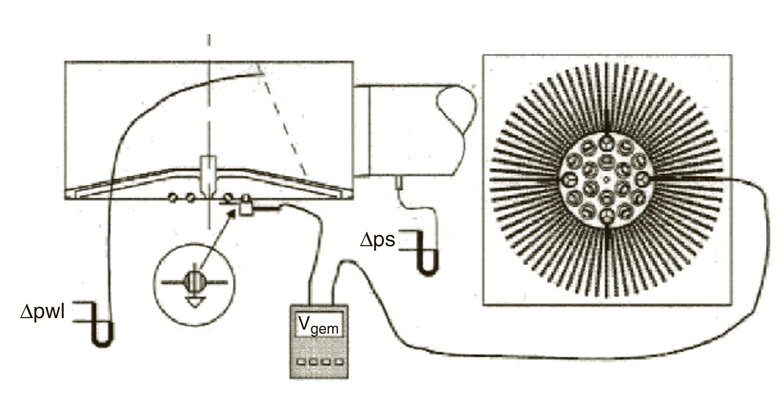


Figure 2.13 – Point de mesure sur diffuseur à rotule et mesure de la pression statique (doc. TROX) avec : Δp_{wi} = pression différentielle, en Pa. — V_{gem} = vitesse d'air mesurée en sortie, en m/s. — Δp_s = pression statique, en Pa

À l'aide du tableau de correspondance fournit par le constructeur, on peut estimer le débit d'air soufflé (à ± 5 % près) :

Tableau 2.11 – Exemple de tableau de détermination du débit soufflé (doc. TROX modèle PASS RQ/R)

V q_v	250 69	300 83	350 97	400 111	450 125	500 139	550 153	600 167	[m³/h] [l/s]
L_{wA}	30	35	39	43	47	50	53	55	[dB(A)]
Δp_s	12	17	23	30	38	47	57	68	[Pa]
Δp_{wi}	12	17	23	30	38	46	56	66	[Pa]
V_{gem}	1,7	2,1	2,5	2,8	3,2	3,6	3,9	4,3	[m/s]

avec :
V = débit nominal, en m3/h.
q_v = débit nominal, en l/s.

Cette méthode a l'avantage d'être très simple et d'être fondée sur des essais en laboratoire réalisés par le constructeur. Par défaut, une approximation peut être réalisée sur site avec ces types de diffuseurs à condition d'avoir la possibilité de mesurer sur site le débit d'air dans la gaine d'alimentation accessible en amont et de respecter les méthodes d'exploration des champs de vitesse.

2.5 Débit d'une bouche de soufflage à induction

La difficulté de toute mesure de débit sur un diffuseur à induction réside dans les phénomènes de re-circulation d'air au niveau des grilles qui fausse la valeur de la mesure du débit d'air primaire.
Dans ce cas, il est nécessaire d'effectuer des mesures de débit dans la gaine de raccordement du diffuseur (ce qui peut très imprécis s'il s'agit d'un tronçon en gaine souple ou avec des longueurs rectilignes insuffisantes), ou avec un balomètre à mesure de pression différentielle (type Accubalance 8375 de TH Industrie par exemple), avec toute l'imprécision que l'on peut alors estimer.

2.6 Débit d'une grille à déplacement

Une des particularités du diffuseur à déplacement est la multitude de perforations que présente sa grille de façade.
L'air arrive généralement dans la chambre de détente par le dessus et est diffusé par des buses de répartition de pression derrière la grille de soufflage constituée de fentes ou de perforations multiples.
La vitesse de sortie d'air est de l'ordre de 0,1 à 0,25 m/s pour les installations de confort où le faible niveau sonore est un paramètre important, et peut atteindre 0,5 m/s pour les applications industrielles.

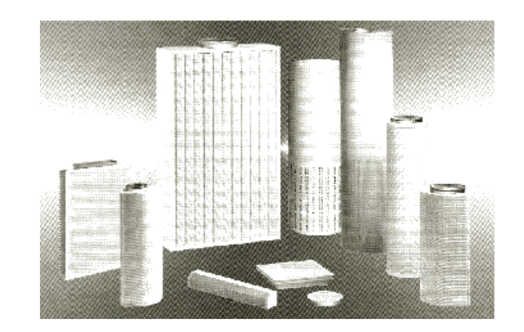


Figure 2.14 – Exemple de diffuseurs à déplacement (doc. TROX)

Compte tenu des vitesses relativement faibles, l'utilisation d'un anémomètre à fil chaud et *a fortiori* d'un anémomètre à hélice n'est pas conseillée.
La technique de détermination du débit d'air soufflé est basée par la mesure de l'écart de pression *Δp* dans la chambre de détente par rapport à l'ambiance, et l'application d'un coefficient *k* en fonction du raccordement. La prise de pression est située à la base du diffuseur à déplacement.

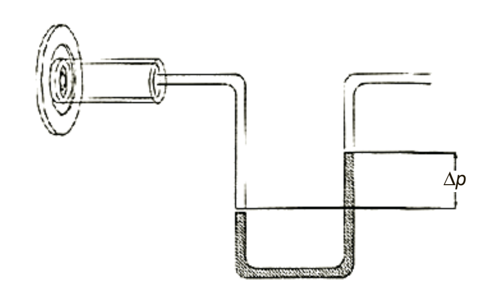


Figure 2.15 – Mesure de la pression (doc. TROX)

$$V = k \cdot \sqrt{\Delta p}$$

avec :
V = débit en m³/h.
k = coefficient propre à chaque type de diffuseur.
Δp = écart de pression statique en Pa.

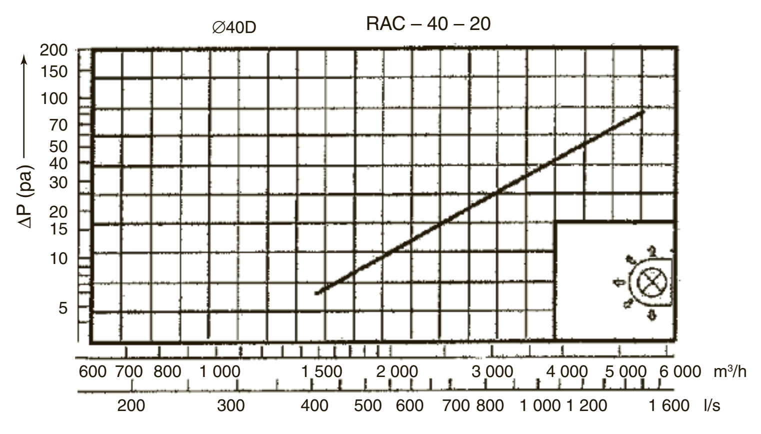


Figure 2.16 – Exemple d'un diffuseur à déplacement semi-circulaire de 2 mètres de haut raccordé en DN400 (doc. TROX)

Dans l’exemple ci-dessus, pour un Δp de 30 Pa, on obtiendrait un débit de 3 250 m^3/h environ.

2.7 Débit d’une grille de désenfumage

Que ce soit en débit de soufflage ou en débit d’extraction, il n’y a pas de méthode normalisée pour mesurer les débits de désenfumage. Les habitudes varient d’un technicien à un autre.
Compte tenu des vitesses relativement élevées (jusqu’à 5 m/s maximum), l’utilisation d’un anémomètre à hélice est possible, et le balayage de la grille par l’une des trois méthodes directes décrites au chapitre 2.3.1 est fréquemment utilisé.

2.8 Débits d’air d’une sorbonne

La méthode de mesure des vitesses d’air frontales d’une sorbonne est précisée par la norme NF EN 14175.
La partie 3 de cette norme décrit la « Méthode d’essai de type » pour l’évaluation de la sécurité et des performances des sorbonnes. Elle concerne plus particulièrement les essais de validation d’origine et décrit les essais de confinement à effectuer avec des gaz traçeurs.
La partie 4 décrit les essais sur site et s’applique lors des vérifications périodiques à effectuer tous les ans (recommandation INRS), dit essais de routine.
L’anémomètre à utiliser doit être de type unidirectionnel avec une sensibilité de ± 20°. La constante de temps de 0,5 m/s et l’incertitude d’un mesurage individuel ne doit pas excéder 0,02 m/s +5 % de l’indication dans la plage comprise entre 0,2 m/s et 1,0 m/s.
Un dispositif d’enregistrement doit permettre d’enregistrer les vitesses pendant une période minimale de 60 secondes avec un pas de temps inférieur ou égal à 1 seconde.
Les sondes anémomètriques doivent être positionnées à l’intersection des lignes d’exploration du champ de vitesse (Figure 2.17) :

– une série d’au moins trois lignes à égale distance entre les bords du plan de mesure intérieur, les deux lignes les plus à l’extérieur étant situées à 100 mm ± 5 mm des bords. Les lignes intermédiaires doivent être situées à une distance ≤ 400 mm des lignes les plus à l’extérieur et l’une par rapport à l’autre.
– une série d’au moins trois lignes à égale distance entre les bords horizontaux du plan de mesure intérieur, les deux lignes les plus à l’extérieur étant situées à 100 mm ± 5 mm des bords horizontaux. Les lignes intermédiaires doivent être situées à une distance ≤ 400 mm des lignes les plus à l’extérieur et l’une par rapport à l’autre.

La vitesse moyenne $\bar{v}$ est calculée arithmétiquement avec les vitesses v_i mesurées à chaque point de mesure (arrondir le résultat à la deuxième décimale) :

$$\bar{v} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} v_i$$

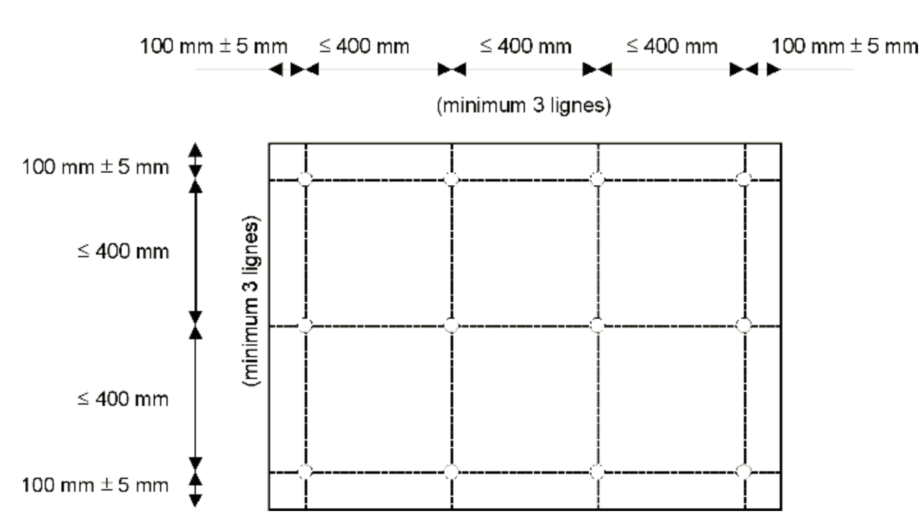


Figure 2.17 – Positions des anémomètres

2.9 Débit d'air d'un plafond diffusant

S'agissant d'un plafond à flux unidirectionnel équipant les salles propres et à environnements maîtrisés, la norme ISO 14644-3 précise que l'instrument de mesure (anémomètre thermique, anémomètre à hélice, tube de Pitot…) doit être distant d'environ 150 à 300 mm du plan de mesure.

Le plan de mesure est divisé en aire de surface égale et le nombre du point de mesure *n* dépend de la surface *S* du plan de mesure :

$$n = \sqrt{10 \cdot S} \text{ avec } n \geq 4$$

Pour vérifier ces résultats, il peut être envisagé de mesurer le débit d'air dans le réseau spécifique qui alimente ce plafond diffusant, voire en sortie de centrale de traitement d'air si elle ne dessert que le plafond diffusant de cette salle.

2.10 Débit d'air d'une poutre climatique

La poutre climatique est un élément terminal « statique ». C'est l'air primaire distribué par la Centrale de Traitement d'Air qui constitue le vecteur d'énergie.

La puissance est obtenue par mélange avec :

– le débit et la température de l'air primaire (de l'ordre de 70 m^3/h à 14 °C par exemple) ;
– l'air induit qui est refroidi sur la batterie froide alimentée en eau glacée

La diffusion de l'air issu de la poutre climatique se déplace quasi-horizontalement en raison de la création de l'effet Coanda. Les essais en laboratoires effectués par les constructeurs ont montré que la position des parois chaudes environnantes (les vitrages en été notamment), les parois froides (les vitrages en hiver et les parois sur

local non chauffé) et autres sources de chaleurs ponctuelles (source d'éclairage, ordinateur…) ont une grande incidence sur la diffusion de l'air.



Figure 2.18 – Diffuseur de poutre climatique et sa pose en faux-plafond (doc. SWEGON)

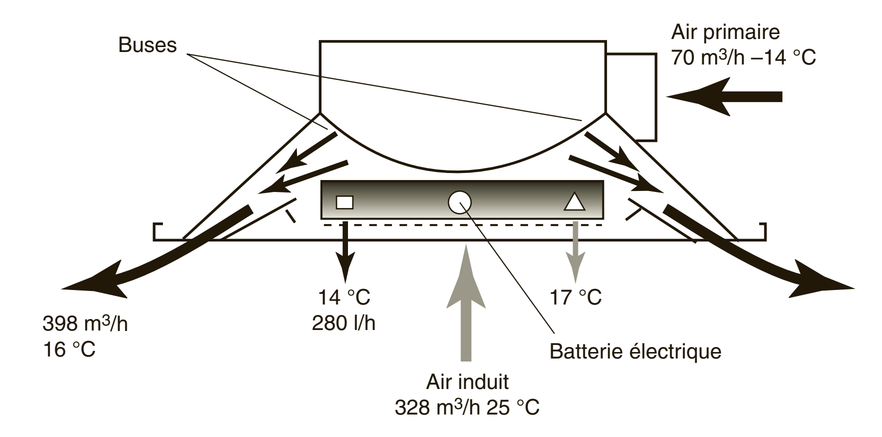


Figure 2.19 – Schématisation de la diffusion de l'air (d'après doc. SWEGON)

Pour vérifier le débit d'air soufflé, comprenant l'air primaire et l'air induit, une méthode consiste à mesurer la vitesse au col de diffusion sur toute la longueur du diffuseur pour obtenir une vitesse moyenne, ainsi que la pression statique dans la gaine d'air primaire et de se référer aux courbes du constructeur pour déterminer le débit résultant.

2.11 Nombre de mesurages à effectuer sur les installations

La norme NF EN 12599 relative aux « procédures d'essai et méthodes de mesure pour la réception des installations de ventilation et de climatisation installées » indique une méthode de détermination du nombre de mesurages « *p* », ou de contrôles, à réaliser en fonction de la quantité « *n* » de systèmes similaires présents sur une installation, ou plus globalement dans un bâtiment.

La méthode repose au choix sur l'utilisation d'un graphe, ou sur les applications mathématiques équivalentes à chaque courbe représentant chacune un niveau

d'exigence ; la courbe A représentant le nombre minimum de mesurages, par défaut si rien n'est précisé dans les pièces « marché », et D représentant le contrôle systématique de chaque système.

Tableau 2.12 – Équations mathématiques

Niveau d'exigence	Nombre de mesurages « *p* » en fonction de « *n* »
A	$p = 1{,}6.\ n^{0{,}40}$
B	$p = 2{,}23.\ n^{0{,}45}$
C	$p = 3{,}16.\ n^{0{,}50}$
D	$p = n$

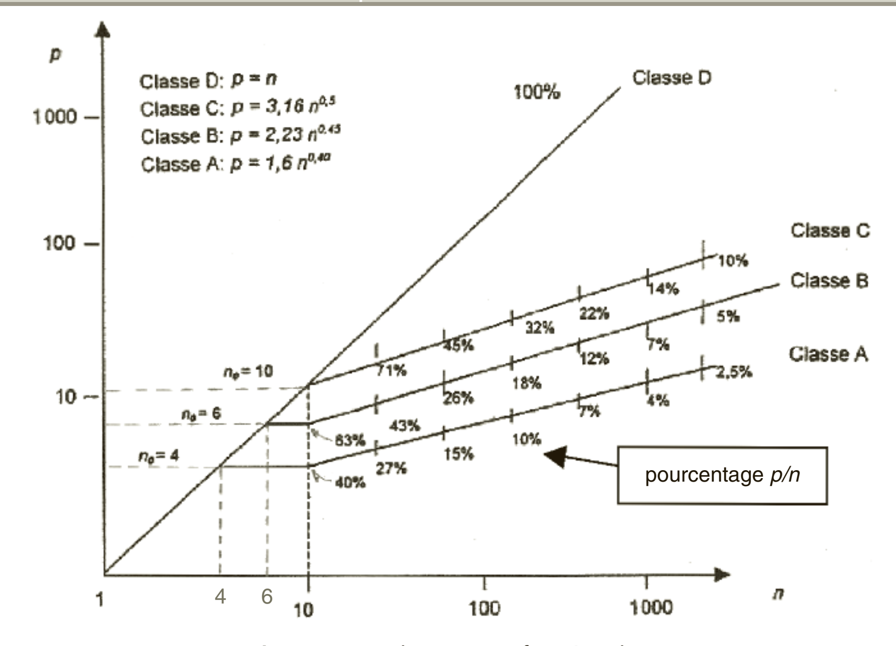


Figure 2.20 – Abaque *p* en fonction de *n*

Pour certains paramètres liés aux conditions ambiantes, la norme NF EN 12599 précise aussi des contraintes supplémentaires de mesurage :

Tableau 2.13 – Contraintes de mesurage supplémentaires

Paramètre	Nombre de mesures	
	Normal	Minimum
température de l'air ambiant relevé en permanence en 24 h	*p*/10	1
humidité de l'air ambiant relevé en permanence en 24 h	*p*/10	1
profil vertical de température	*p*/10	1
vitesse de l'air intérieur	*p*/10	1
niveau de pression acoustique	*p*/5	3

Exemple

Une installation de climatisation alimente 96 bureaux individuels et des espaces paysagés divisés en 48 zones.

Le contrat de travaux demande de mesurer la température de l'air ambiant dans des conditions proches des conditions théoriques dans les bureaux et dans les zones paysagées conformément à la norme NE EN 12599 avec un niveau d'exigence B.

Combien de mesurages faudra-t-il effectuer ?

Nombre total de mesurage :

Dans les bureaux ⇒ $p = 2{,}23.96^{0{,}45} = 17{,}39$ (arrondi au plus proche) = **17 mesurages**.

Dans les zones paysagées ⇒ $p = 2{,}23.48^{0{,}45} = 12{,}73$ = **13 mesurages**.

Cas de mesurage particulier :

S'agissant de mesurage de la température ambiante, il faut prévoir des, ou un, relevés en permanence en 24 h : $p/10$ avec minimum 1.

Pour les bureaux ⇒ 2 relevés en permanence en 24 h et 15 mesurages localisés.

Pour les zones paysagées ⇒ 1 relevé en permanence en 24 h et 12 mesurages localisés.

Pour ce qui concerne en particulier le mesurage de niveau de pression acoustique, se reporter au chapitre « Acoustique ».

3 • ANNEXES

3.1 Rappels de mécanique des fluides appliqués aux sondes de pression

Comment déterminer la vitesse d'un fluide à partir de mesures de pression ?
L'utilisation de sonde de pression pour déterminer la vitesse de l'air dans le domaine du génie climatique notamment a été rendue possible car plusieurs hypothèses ont été retenues.
Tout part de l'équation générale de la dynamique :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U\frac{\partial U}{\partial s} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial s} + g_S + f_S \qquad (1)$$

avec :
U = module de vitesse (m/s).
s = abscisse curviligne le long de la trajectoire.
ρ = masse volumique du fluide.
p = pression statique.
g_S = composante sur la tangente des forces de gravité par unité de masse.
f_S = projection sur la tangente des forces de frottement par unité de masse.

Cette équation s'applique à tous les types de fluides, qu'ils soient compressibles ou compressibles. Dans le cas de fluides compressibles gazeux, on pourra négliger le terme de pesanteur, ce qui revient à poser $g_S = 0$.
De même, si on considère l'air comme un fluide non visqueux, les forces de frottement sont négligeables et on peut écrire $f_S = 0$.
Dans le cas d'un écoulement permanent stabilisé, donc invariable dans le temps (c'est ce que l'on considère pendant les opérations de mesurage), le terme $\frac{\partial U}{\partial t} = 0$.
L'équation générale de la dynamique(1) est donc réduite à :

$$U\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial s} = 0 \qquad (2)$$

On voit apparaître une relation entre la vitesse du fluide, sa masse volumique, la pression et l'accélération de la pesanteur. Cette relation est à la base des méthodes de mesure de vitesse à partir de mesures de pression.

Un autre paramètre qui joue un rôle important en mécanique des fluides est la vitesse du son , vitesse de propagation de perturbations très petites de pression.
Pour l'air, considéré comme un gaz parfait à capacités thermiques constantes, on exprime l'isentropique par la loi de Laplace qui relie la pression et la masse volumique par :

$$\frac{p}{\rho^{\gamma}} = \text{Cste} \tag{3}$$

avec :
p = pression statique.
ρ = masse volumique du fluide.
γ = rapport des capacités thermiques massiques à pression et températures constantes ($\gamma = \frac{C_P}{C_T}$ = 1,4 dans le cas des gaz diatomique comme l'air).
La vitesse du son s'écrit alors :

$$a^2 = \gamma\frac{p}{\rho} = \gamma r T \tag{4}$$

avec :
a = vitesse du son (≈ 329 m/s dans l'air à 0 °C ; ≈ 340 m/s dans l'air à 20 °C ; ≈ 278 m/s dans l'air à – 80 °C, et ≈ 1 500 m/s dans l'eau).
r = constante des gaz parfaits (rapport de la constante universelle des gaz parfaits à la masse molaire du gaz = 8 320).
T = température absolue locale du fluide (exprimée en degré Kelvin K).

Dans le cas d'un fluide compressible et d'un écoulement adiabatique et continu, l'évolution du gaz est isentropique.
La pression et la masse volumique étant reliées par l'équation de Laplace (3), l'intégration de l'équation de la dynamique (2) le long de la trajectoire a pour résultat :

$$\frac{U_M^2}{2} + \frac{\gamma}{\gamma - 1}\frac{p_M}{\rho_M} = \frac{U_N^2}{2} + \frac{\gamma}{\gamma - 1}\frac{p_N}{\rho_N} \tag{5}$$

Le fluide étant compressible, la vitesse du son va jouer un rôle important et on montre qu'elle intervient par son rapport M au module de la vitesse d'écoulement, rapport appelé « nombre de Mach » (Ernst MACH, physicien autrichien, né en 1838 et décédé en 1916) :

$$M = \frac{U}{a} \tag{6}$$

avec :
M = nombre de Mach (nombre sans dimension).
U = module de vitesse du fluide (m/s).
a = vitesse du son dans ce même fluide (m/s).

La vitesse du son étant infinie dans un fluide incompressible, on peut remarquer que le nombre de mach devient nul dans ce cas-là.

En s'appuyant sur la caractéristique des gaz parfaits qui présentent la particularité théorique d'avoir une capacité thermique massique constante, et en considérant la vitesse du son issue de l'expression (4) $a = \sqrt{\gamma r T}$, l'équation de la dynamique devient :

$$T_M\left(1 + \frac{\gamma - 1}{2}M_M^2\right) = T_N\left(1 + \frac{\gamma - 1}{2}N_N^2\right) \tag{7}$$

soit, compte tenu de l'équation de Laplace :

$$p_M\left(1 + \frac{\gamma - 1}{2}M_M^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} = p_N\left(1 + \frac{\gamma - 1}{2}N_N^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \tag{8}$$

Les relations (7) et (8) restent valables si le point N est un point d'arrêt de l'écoulement, à la simple condition que l'arrêt se fasse de façon isentropique. En ce point d'arrêt, les températures et pression prennent respectivement les valeurs T_i et p_i (température et pression isentropique) et on peut écrire :

$$T_i = T\left(1 + \frac{\gamma - 1}{2}M^2\right) \text{ et } p_i = p(1 + \frac{\gamma - 1}{2}M^2)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

où M, p, T sont les valeurs au point de courant de la ligne de courant et p_i, T_i les conditions d'arrêt isentropique sur cette même ligne de courant.
Cette dernière équation peut être développée en série de M pour donner :

$$p_i = p + \frac{\gamma}{2}pM^2\left(1 + \frac{1}{4}M^2 + \frac{2 - \gamma}{24}M^4 + \ldots\right)$$

soit encore :

$$p_i = p + \frac{1}{2}\rho U^2\left(1 + \frac{1}{4}M^2 + \frac{2 - \gamma}{24}M^4 + \ldots\right)$$

Si l'écoulement est tel que le nombre de Mach est petit devant 1 (écoulement subsonique), les termes d'ordre supérieur à 2 du développement deviennent négligeables et l'équation se réduit à l'équation de Bernouilli : le fluide est considéré comme incompressible.

On a alors $p_i = p + \frac{\rho U^2}{2}$ d'où :

$$U = \sqrt{\frac{2(p_i - p)}{\rho}} \tag{9}$$

avec :
U = module de vitesse du fluide (m/s).
p_i = pression d'arrêt (Pa).
p = pression statique (Pa).
ρ = masse volumique du fluide (kg/m^3).

On remarque que cette méthode ne permet pas de déterminer la direction du vecteur vitesse mais seulement son module. On devra donc se méfier lors de l'utilisation d'un tube de Pitot de mettre l'étrave à contre-courant de l'écoulement et l'antenne bien parallèle aux parois du conduit. Le bras d'alignement prévu sur le type NPL sert justement à repérer ces deux éléments dans l'espace.
L'air est un gaz parfait compressible. Néanmoins, comme vu ci-dessus, l'application du théorème de Bernouilli concernant les fluides incompressibles est néanmoins possible. Nous allons démontrer que l'équation finale liant la vitesse aux pressions et à la masse volumique reste la même :

$$p_M + \rho g z_M + 1/2\rho U_M^2 = p_N + \rho g z_M + 1/2\rho U_N^2 \qquad (10)$$

avec :
p = pression statique locale ;
ρ = masse volumique du fluide ;
g = accélération de la pesanteur ;
z = altitude comptée positivement vers le haut ;
U = vitesse du fluide.

Le terme « $\rho g z$ » représente les forces de pression dues à la hauteur du point considéré (ici le point M et le point N) ;
Le terme « $p + \rho g z$ » représente la pression motrice. Pour un gaz que l'on pourrait considérer comme incompressible et non pesant, la pression motrice est égale à la pression statique ;
Le terme « $1/2\rho U^2$ » représente la pression cinétique ;
Le terme « $p + 1/2\rho U^2$ » représente la pression d'arrêt p_i.

Dans le cas d'un tube de Pitot, la différence de hauteur entre l'étrave (où l'on mesure la pression d'arrêt au point M (ou encore la pression totale), et le point N où l'on mesure la pression statique est de quelques millimètres (voir fig. 1.1 à 1.5), ce qui est négligeable comme différence de pression dans le cas de l'air. Les termes $\rho g z$ s'annulent donc dans le théorème de Bernouilli.
D'autre part, la vitesse à l'extrémité de l'étrave, point d'arrêt de l'écoulement, est égale à zéro.
Il reste donc :

$$p_M = p_N + 1/2\rho U_N^2$$

D'où l'équation :

$$U = \sqrt{\frac{2(p_M - p_N)}{\rho}} = \sqrt{\frac{2(p_i - p)}{\rho}} \qquad (11)$$

avec :
U = module de vitesse du fluide (m/s).
$p_M = p_i$ = pression d'arrêt ou pression totale du fluide (Pa).
$p_N = p$ = pression statique (Pa).
ρ = masse volumique de l'air (kg/m^3).

Conclusion : en retenant certaines hypothèses caractéristiques de l'air dans les installations de génie climatique, l'équation générale de la dynamique des fluides compressibles permet de justifier l'utilisation de l'équation simplifiée de Bernouilli.

La vitesse de l'air dans une gaine peut être déterminée à partir des mesures de la pression totale et de la pression statique.

3.2 Calcul de la masse volumique de l'air en fonction de la température, de la pression et de l'hygrométrie

L'air véhiculé dans les gaines est constitué d'air sec et d'eau sous forme de vapeur. La masse volumique de cet air humide est la masse d'air sec et d'humidité par unité de volume d'air humide. Elle est désignée par le symbole ρ.

$$\rho = \frac{m_{as} + m_{v}}{V} = \frac{m_{as}}{V} + \frac{m_{v}}{V} \qquad \text{(A)}$$

Comme il a été démontré ci-avant, l'air humide peut être considéré comme un gaz parfait. Cette approximation permet d'appliquer la loi des gaz parfaits :

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T \qquad \text{(B)}$$

avec :

p = pression totale du gaz (Pa).

V = volume du gaz (m^3).

m = masse correspondante du gaz (kg).

M = masse molaire du gaz (kg).

R = constante universelle des gaz parfaits = 8320 (J/kilomole.K).

T = température absolue du gaz (θ + 273.15 °C).

Rappel

« La pression d'un mélange de gaz est égale à la somme de la pression de tous les gaz le constituant » (loi de Dalton)

La pression de l'air humide est égale à la somme des gaz le constituant :

$$p = p_{as} + p_{v} \qquad \text{(C)}$$

p = pression absolue de l'air humide.

p_{as} = pression de l'air sec.

p_{v} = pression partielle de la vapeur d'eau contenue dans l'air humide.

Appliquons l'équation (A) aux fluides constituant l'air humide :

Pour l'air sec :

M = masse molaire de l'air sec = 29 kg

$$\rho = \frac{m_{as}}{V} = \frac{M \cdot p_{as}}{R \cdot T}$$

A

LES MESURES DE DÉBITS AÉRAULIQUES

d'où :

$$\rho_{as} = \frac{p_{as}}{287 \cdot T}$$

Pour la vapeur d'eau :
M = masse molaire de la vapeur d'eau = 18 g.mol^{-1}

$$\rho_v = \frac{m_v}{V} = \frac{M \cdot p_v}{R \cdot T}$$

d'où :

$$\rho_v = \frac{p_v}{462 \cdot T}$$

De l'équation (C), on peut en déduire que $p_{as} = p - p_v$
D'où :

$$\rho = \frac{p - p_v}{287 \cdot T} + \frac{p_v}{462 \cdot T}$$

Après simplification, on peut calculer la masse volumique ρ de l'air humide :

$$\rho = \frac{p}{287 \cdot T} - 1{,}32.10^{-3}\frac{p_v}{T}$$

Si l'on connaît la pression de vapeur saturante p_{vs} en fonction de la température et l'hygrométrie de l'air, on peut aussi écrire :

$$p_v = \frac{\varphi}{100} \cdot p_{vs}$$

d'où :

$$\rho = \frac{p}{287 \cdot T} - 1.32.10^{-5}\frac{\varphi \cdot p_{vs}}{T}$$

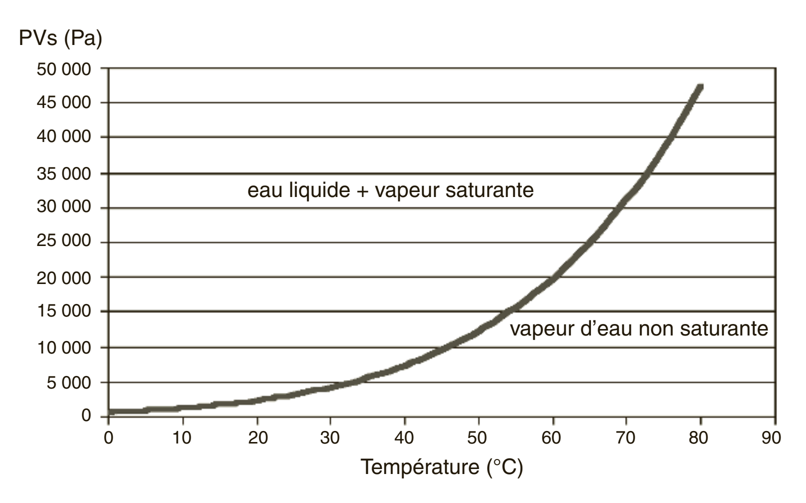


Figure 3.1 – Courbe de saturation de la vapeur d'eau

Tableau 3.1 – Pression de vapeur saturante de l'eau en fonction de la température

Température (°C)	Pression de vapeur saturante (Pa)	Température (°C)	Pression de vapeur saturante (Pa)	Température (°C)	Pression de vapeur saturante (Pa)
0	610,7	28	3 778,2	55	15 739,0
1	656,6	29	4 003,9	56	16 509,0
2	705,5	30	4 241,3	57	17 311,0
3	757,6	31	4 490,8	58	18 145,0
4	813,1	32	4 753,0	59	19 014,0
5	872,1	33	5 028,4	60	19 918,0
6	934,9	34	5 317,5	61	20 859,0
7	1 001,6	35	5 620,9	62	21 837,0
8	1 072,4	36	5 939,3	63	22 853,0
9	1 147,7	37	6 273,1	64	23 910,0
10	1 227,5	38	6 623,1	65	25 008,0
11	1 312,2	39	6 989,8	66	26 148,0
12	1 401,9	40	7 374,0	67	27 332,0
13	1 497,1	41	7 776,3	68	28 562,0
14	1 597,8	42	8 197,3	69	29 837,0
15	1 704,5	43	8 637,9	70	31 161,0
16	1 817,3	44	9 098,8	71	32 534,0
17	1 936,7	45	9 580,7	72	33 958,0
18	2 062,8	46	10 084,0	73	35 434,0
19	2 196,2	47	10 610,0	74	36 963,0
20	2 337,0	48	11 160,0	75	38 548,0
21	2 485,6	49	11 734,0	76	40 190,0
23	2 807,9	50	12 333,0	77	41 891,0
24	2 982,3	51	12 959,0	78	43 651,0
25	3 166,1	52	13 611,0	79	45 474,0
26	3 359,7	53	14 291,0	80	47 360,0
27	3 563,6	54	15 000,0		

Exemple de calcul de la masse volumique de l'air humide :

Valeur de la masse volumique ρ de l'air humide à 30 °C, avec humidité relative φ de 50 % et sous pression atmosphérique ?

– détermination de la pression de vapeur saturante :

⇒ pour θ de 30 °C, $p_{vs} = 4\ 241.3$ Pa (voir Tab. 3.1)

– calcul de la masse volumique ρ de l'air humide :

En appliquant l'équation précédente ;

$$\Rightarrow \rho = \frac{101\ 325}{287 \cdot (30 + 273{,}15)} - 1{,}32.10^{-5} \cdot \frac{50 \cdot 4\ 241{,}3}{30 + 273{,}15}$$

$$\Rightarrow \rho = 1{,}164 - 0{,}009$$

$$\Rightarrow \rho \approx 1{,}155 \text{ kg/m}^3$$

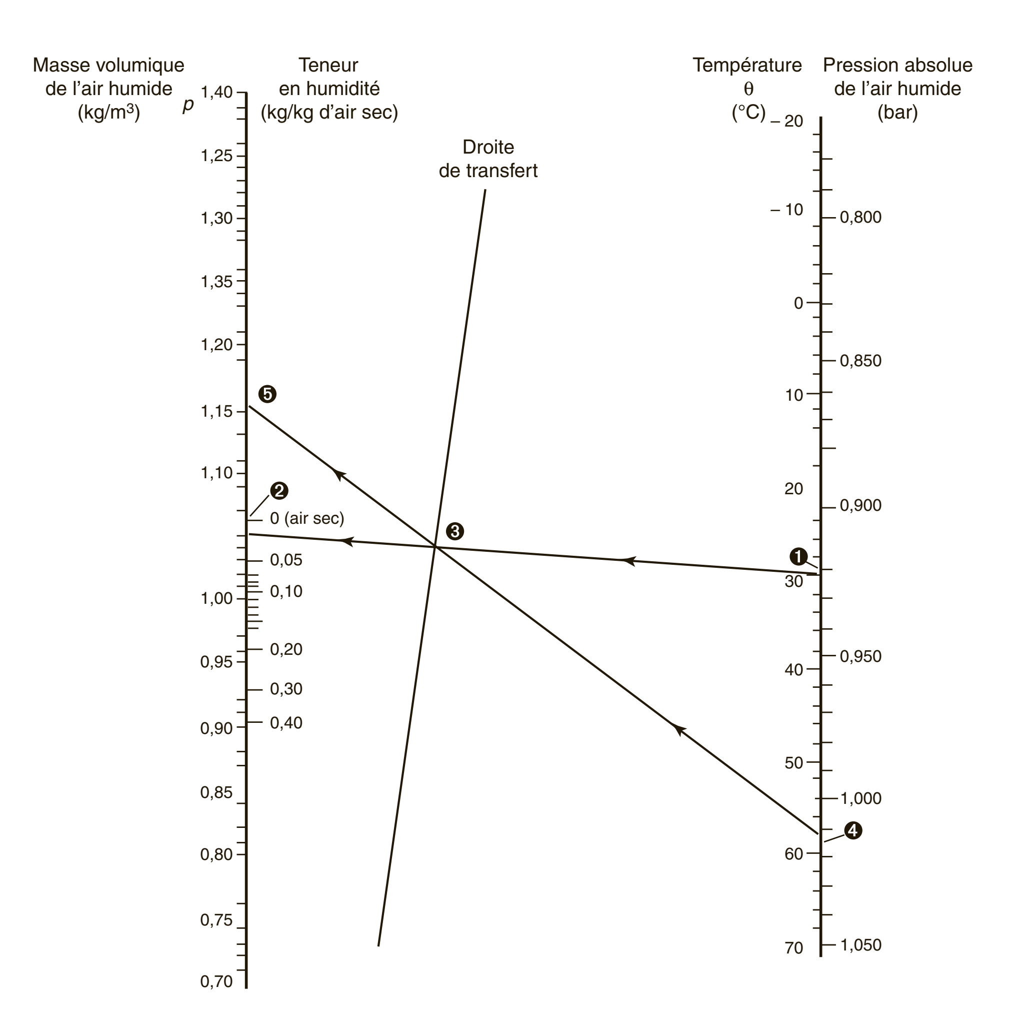


Figure 3.2 – Masse volumique de l'air humide (Porcher)

Il est possible d'utiliser un diagramme à points alignés en première approximation.
À partir des mêmes données que précédemment :

- point 1 : température de l'air = 30 °C;
- point 2 : teneur en humidité = 0.0135 kg/kg as (correspondant à 30 °C et 50 %) ;
- point 3 : point de transfert ;
- point 4 : pression absolue de l'air =1.013 bar.

→ Le point 5 : masse volumique de l'air $\rho \approx 1{,}155$ kg/m^3

3.3 Calcul du diamètre hydraulique D_h d'une conduite

Dans le cas de conduite à géométrie complexe, rectangulaire ou carré par exemple, il est nécessaire d'utiliser la notion de « diamètre hydraulique », noté D_h. Cette grandeur correspond au diamètre équivalent d'une conduite de section circulaire respectant un rapport entre la section et le périmètre de la conduite réelle.
La relation théorique, établit par M. CHESY en 1820, est la suivante :

$$D_h = \frac{4S}{P}$$

Avec :
S = la section de passage du fluide, en m.
P = le périmètre « mouillé » de la conduite, en m.

On utilise cette forme en cas de régime **turbulent** ($R_e > 2\,200$).

S'il s'agit d'une conduite rectangulaire de côtés a et b : $D_h = \dfrac{4ab}{2(a+b)} = \dfrac{2ab}{a+b}$

S'il s'agit d'une conduite carrée de côté a : $D_h = D_h = \dfrac{4a^2}{4a} = a$

Cela se vérifie pour une conduite de section circulaire : avec $S = \dfrac{\pi D^2}{4}$ et $P = \pi D$,

on obtient : $D_h = \dfrac{4\dfrac{\pi D^2}{4}}{\pi D} = D$, c.q.f.d.

Dans le cas d'un régime **laminaire** (Re <2 200), on utilise plutôt l'équation suivante (source ASHRAE) :

$$D_h = 1{,}3\frac{(ab)^{0{,}625}}{(a+b)^{0{,}25}}$$

3.4 Exploration du champ de vitesse avec la méthode « log-Tchebycheff »

Par hypothèse, la forme mathématique de la loi de répartition des vitesses en fonction de la distance à la paroi est logarithmique dans les éléments disposés à la périphérie de la section et polynomiale dans les autres éléments.

Quelques impératifs sont à respecter :

– le nombre de points de mesure doit être égal à au moins 25 pour une gaine rectangulaire et égal à 3 par rayon pour une gaine circulaire.
– la distance amont entre la section de mesure et une singularité importante doit être d'au moins 20 fois le diamètre (ou 80 fois le rayon hydraulique d'une section quelconque).
– la distance aval entre la section de mesure et une singularité importante doit être d'au moins 5 fois le diamètre (ou 20 fois le rayon hydraulique d'une section quelconque).
– le rapport d/D du diamètre d du tube de Pitot sur le diamètre D de la conduite ne doit pas dépasser 0,02.

3.4.1 Section rectangulaire

La décomposition du champ de vitesse se fait par cinq, six ou sept verticales parallèles au petit côté du rectangle, et sur chacune d'elles sont disposés cinq points de mesure.

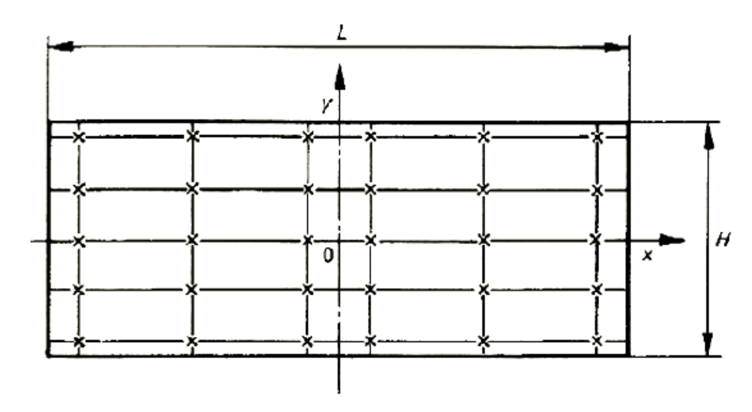


Figure 3.3 – Exemple de répartition « log-Tchebycheff » avec 5 points de mesure sur 6 parallèles (doc. AFNOR).

La positions des points de mesure sont définies à l'aide du tableau ci-dessous. Les distances X_i/L et Y_i/H sont exprimées depuis les axes de la gaine.

Tableau 3.2 – Répartition « log-Tchebycheff » pour une gaine rectangulaire

Nbre de points de mesure	Valeurs de X_i/L ou de Y_i/H par rapport à l'axe			
5	0	± 0,212	± 0,426	/
6	± 0,063	± 0,265	± 0,439	/
7	0	± 0,134	± 0,297	± 0,447

Contrairement à la méthode « log-linéaire », les coefficients de pondération sont choisis égaux. La vitesse débitante est égale à la moyenne arithmétique des vitesses locales mesurées aux différents points.

3.4.2 Section circulaire

La position des points de mesure correspond aux valeurs suivantes du rayon relatif r/R_i (en partant de l'axe) ou de la distance relative y/D_i (en partant de la paroi).

Tableau 3.3 – Répartition « log-Tchebycheff » pour une gaine circulaire

Nombre de points de mesure par rayon	r/R_i	y/D_i
3	0,375	0,312
	0,725	0,137
	0,936	0,032
4	0,331	0,334
	0,612	0,193
	0,800	0,100
	0,952	0,024
5	0,287	0,357
	0,570	0,215
	0,689	0,155
	0,847	0,076
	0,962	0,019

Les coefficients de pondération sont choisis égaux. La vitesse débitante est égale à la moyenne arithmétique des vitesses locales mesurées.

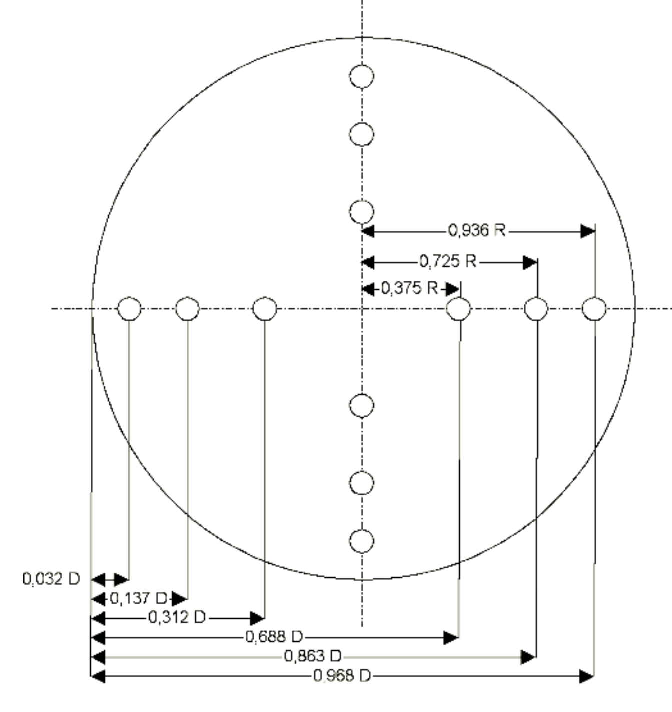


Figure 3.4 – Exemple de répartition « log-Tchebycheff » avec 3 points de mesure par rayon (doc. AFNOR)

3.5 Exploration du champ de vitesse avec la méthode « log-linéaire »

Par hypothèse, la forme mathématique de la loi de répartition des vitesses s'écrit sous la forme :

$$u = A, \log(y) + By + C$$

avec :
y = distance à la paroi.
A, *B* et *C* = trois constantes quelconques (sauf pour l'élément annulaire où *B* est égal à 0).
Quelques impératifs sont à respecter :

- le nombre de points de mesure doit être égal à au moins 25 pour une gaine rectangulaire et égal à 3 par rayon pour une gaine circulaire.
- la distance amont entre la section de mesure et une singularité importante doit être d'au moins 20 fois le diamètre (ou 80 fois le rayon hydraulique d'une section quelconque).
- la distance aval entre la section de mesure et une singularité importante doit être d'au moins 5 fois le diamètre (ou 20 fois le rayon hydraulique d'une section quelconque).
- le rapport *d/D* du diamètre d du tube de Pitot sur le diamètre *D* de la conduite ne doit pas dépasser 0,02.

3.5.1 Section rectangulaire

La section de mesure est décomposée pour obtenir 26 points de mesurage auxquels ont attribut un coefficient de pondération. La vitesse débitante est égale à la moyenne pondérée des vitesses locales mesurées :

$$U = \frac{\Sigma k_i v_i}{\Sigma k_i}$$

Pour la méthode à 26 points, $\Sigma k_i = 96$. La valeur du coefficient de pondération k correspondant à chaque point de mesure est donnée dans le tableau suivant.

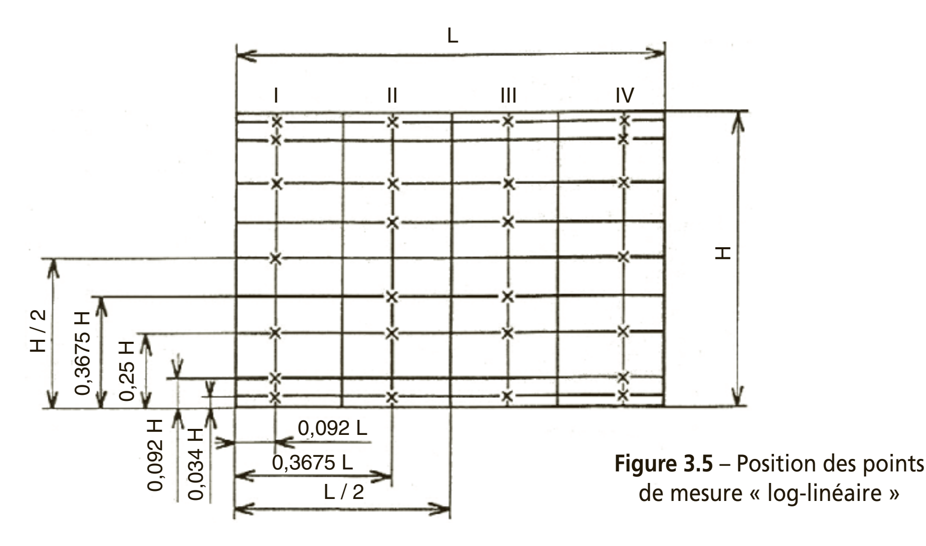


Figure 3.5 – Position des points de mesure « log-linéaire »

Les valeurs de pondération *k* sont données dans le tableau suivant :

Tableau 3.4 – Valeur de *k* pour les pondérations des vitesses locales

	I	II	III	IV
$\frac{h}{H}$ \ $\frac{l}{t}$	0,092	0,367 5	0,632 5	0,908
0,034	2	3	3	2
0,092	2	–	–	2
0,250	5	3	3	5
0,367 5	–	6	6	–
0,500	6	–	–	6
0,632 5	–	6	6	–
0,750	5	3	3	5
0,908	2	–	–	2
0,966	2	3	3	2

3.5.2 Section circulaire

La position des points de mesure correspond aux valeurs suivantes du rayon relatif r/R_i ou de la distance relative à la paroi y/D_i.

Tableau 3.5 – Position des points de mesure « log-linéaire »

Nombre de points de mesure par rayon	r/R_i	y/D_i
3	0,358	0,320
	0,730	0,135
	0,936	0,032
5	0,277	0,361
	0,566	0,217
	0,695	0,152
	0,847	0,076
	0,962	0,019

La vitesse moyenne sur chaque rayon est égale à la moyenne arithmétique des vitesses aux points de mesures situés sur ce rayon. La vitesse débitante est égale à la moyenne arithmétique des moyennes sur chaque rayon. La vitesse débitante est donc égale à la « moyenne des moyennes arithmétiques » des vitesses locales.

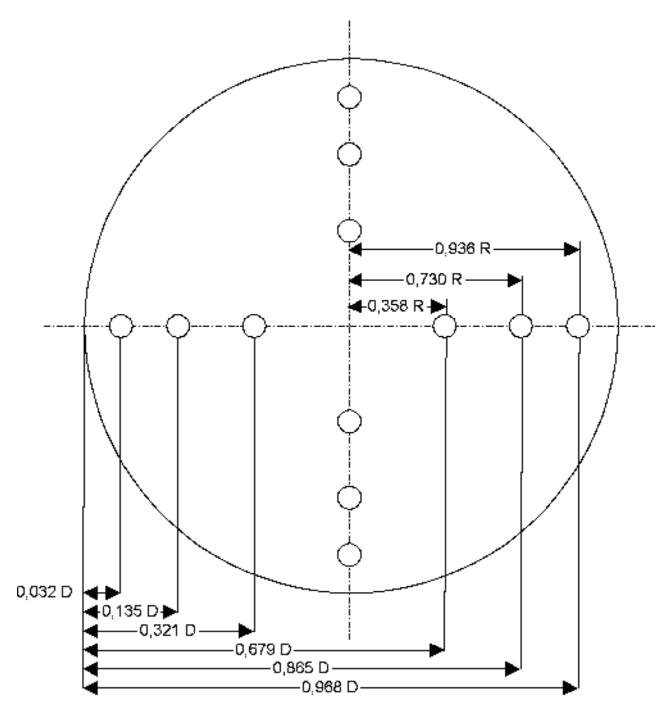


Figure 3.6 – Exemple de répartition « log-linéaire » avec 3 points de mesure par rayon (doc. AFNOR)

3.6 Facteur de correction K

Comme indiqué au chapitre 1 concernant les tubes de Pitot raccordé à un micromanomètre électronique, le facteur correctif K permet de modifier la valeur du mesurage en fonction d'une température et d'une pression différentes des conditions normales de température et de pression.

Tableau 3.6 – Facteur de correction K par rapport à 0 °C/1 013 mbar

Température (°C)	Pression (mbar)					
	940	960	980	1 000	1 020	1 040
–30	0,9794	0,9691	0,9592	0,9496	0,9402	0,9311
–20	0,9994	0,9889	0,9787	0,9689	0,9594	0,9501
–10	1,0189	1,0082	0,9979	0,9879	0,9781	0,9687
0	1,0381	1,0272	1,0167	1,0065	0,9966	0,9869
10	1,0569	1,0459	1,0352	1,0247	1,0147	1,0048
20	1,0755	1,0642	1,0533	1,0427	1,0324	1,0224
30	1,0937	1,0822	1,0711	1,0603	1,0499	1,0397
40	1,1116	1,0999	1,0886	1,0777	1,0671	1,0568
50	1,1292	1,1173	1,1059	1,0948	1,0840	1,0735

Tableau 3.6 – Facteur de correction K par rapport à **0 °C/1 013 mbar** *(suite)*

Température (°C)	Pression (mbar)					
	940	**960**	**980**	**1 000**	**1 020**	**1 040**
60	1,1465	1,1345	1,1229	1,1116	1,1006	1,0900
70	1,1636	1,1514	1,1396	1,1282	1,1170	1,1063
80	1,1804	1,1681	1,1561	1,1445	1,1332	1,1223
90	1,1971	1,1845	1,1724	1,1606	1,1491	1,1380
100	1,2134	1,2007	1,1884	1,1765	1,1649	1,1536
150	1,2922	1,2787	1,2656	1,2528	1,2405	1,2285
200	1,3664	1,3521	1,3383	1,3248	1,3118	1,2991
250	1,4368	1,4218	1,4072	1,3931	1,3793	1,3660
300	1,5040	1,4882	1,4729	1,4581	1,4438	1,4298
400	1,6299	1,6129	1,5963	1,5803	1,5647	1,5496
500	1,7468	1,7285	1,7108	1,6936	1,6769	1,6607
600	1,8564	1,8369	1,8181	1,7998	1,7821	1,7649
700	1,9598	1,9393	1,9194	1,9001	1,88144	1,8632

Nota

En considérant la température de référence de 0 °C, et en interpolant pour 1 013 mbar entre 1 000 et 1020 mbar, on retrouve K=1.

Tableau 3.7 – Facteur de correction K par rapport à **20 °C/1 013 mbar**

Température (°C)	Pression (mbar)					
	940	**960**	**980**	**1 000**	**1 020**	**1 040**
– 30	0,9454	0,9355	0,9259	0,9166	0,9076	0,8988
– 20	0,9646	0,9545	0,9448	0,9353	0,9260	0,9171
– 10	0,9835	0,9732	0,9632	0,9536	0,9442	0,9350
0	1,0020	0,9916	0,9814	0,9715	0,9619	0,9527
10	1,0202	1,0096	0,9992	0,9892	0,9794	0,9699
20	1,0381	1,0272	1,0167	1,0065	0,9966	0,9869
30	1,0557	1,0446	1,0339	1,0235	1,0134	1,0036
40	1,0729	1,0617	1,0508	1,0403	1,0300	1,0201
50	1,0900	1,0785	1,0675	1,0567	1,0463	1,0362
60	1,1067	1,0951	1,0839	1,0730	1,0624	1,0521
70	1,1232	1,1114	1,1000	1,0890	1,0782	1,0678
80	1,1394	1,1275	1,1160	1,1047	1,0939	1,0833
90	1,1555	1,1434	1,1316	1,1203	1,1092	1,0985
100	1,1713	1,1590	1,1471	1,1356	1,1244	1,1135
150	1,2473	1,2343	1,2216	1,2093	1,1974	1,1858
200	1,3190	1,3052	1,2918	1,2788	1,2662	1,2540
250	1,3869	1,3724	1,3583	1,3447	1,3314	1,3186

Tableau 3.7 – Facteur de correction K par rapport à **20 °C/1 013 mbar** *(suite)*

Température (°C)	Pression (mbar)					
	940	960	980	1 000	1 020	1 040
300	1,4517	1,4365	1,4218	1,4075	1,3936	1,3802
400	1,5733	1,5568	1,5409	1,5254	1,5104	1,4958
500	1,6862	1,6685	1,6514	1,6348	1,6187	1,6030
600	1,7919	1,7731	1,7550	1,7373	1,7202	1,7036
700	1,8917	1,8719	1,8527	1,8341	1,8160	1,7985

Nota

En considérant la température de référence de 20 °C, et en interpolant pour 1 013 mbar entre 1 000 et 1020 mbar, on retrouve K=1.

Tableau 3.8 – Facteur de correction K par rapport à **22 °C/1 013 mbar**

Température (°C)	Pression (mbar)					
	940	960	980	1 000	1 020	1 040
– 30	0,9422	0,9323	0,9227	0,9135	0,9045	0,8957
– 20	0,9614	0,9513	0,9415	0,9321	0,9229	0,9140
– 10	0,9802	0,9699	0,9600	0,9503	0,9410	0,9319
0	0,9986	0,9882	0,9781	0,9682	0,9587	0,9494
10	1,0168	1,0061	0,9958	0,9858	0,9761	0,9667
20	1,0346	1,0237	1,0132	1,0031	0,9932	0,9836
30	1,0521	1,0411	1,0304	1,0200	1,0100	1,0002
40	1,0693	1,0581	1,0473	1,0367	1,0265	1,0166
50	1,0863	1,0749	1,0639	1,0532	1,0428	1,0327
60	1,1029	1,0914	1,0802	1,0693	1,0588	1,0486
70	1,1194	1,1077	1,0963	1,0853	1,0746	1,0642
80	1,1356	1,1237	1,1122	1,1010	1,0901	1,0796
90	1,1516	1,1395	1,1278	1,1165	1,1055	1,0948
100	1,1673	1,1551	1,1432	1,1317	1,1206	1,1098
150	1,2431	1,2301	1,2174	1,2052	1,1933	1,1818
200	1,3145	1,3007	1,2874	1,2745	1,2619	1,2497
250	1,3822	1,3678	1,3537	1,3401	1,3269	1,3141
300	1,4468	1,4316	1,4170	1,4027	1,3889	1,3755
400	1,5680	1,5515	1,5356	1,5202	1,5052	1,4907
500	1,6804	1,6628	1,6458	1,6292	1,6132	1,5976
600	1,7858	1,7671	1,7490	1,7314	1,7144	1,6978
700	1,8853	1,8656	1,8464	1,8279	1,8099	1,7924

Nota

En considérant la température de référence de 22 °C par interpolation entre 20 et 30 °C, et en interpolant pour 1 1013 mbar entre 1 000 et 1020 mbar, on retrouve K=1.

B

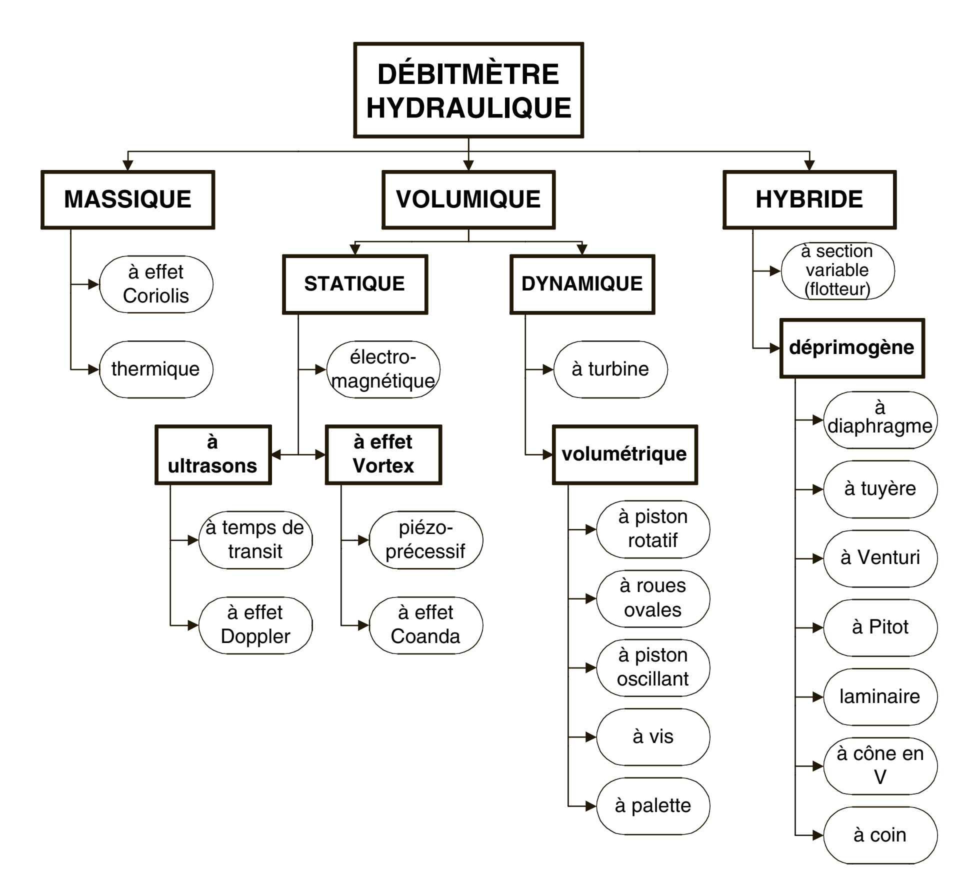
Les mesures de débits hydrauliques

4 • LES MOYENS DE MESURAGE

En matière de mesurage de débit hydraulique, on distingue trois grandes familles de débitmètres suivant le paramètre physique mesuré :

– les débitmètres massiques ;
– les débitmètres volumiques ;
– les débitmètres hybrides (qui utilisent à la fois les propriétés massiques et volumiques du fluide).

Chaque famille se décline en plusieurs types différents selon les technologies utilisées.



Synoptique récapitulatif des principaux débitmètres hydrauliques

Ce chapitre se propose d'exposer l'ensemble des débitmètres utilisés dans le domaine du génie climatique, étant entendu que certains modèles sont plus utilisés que d'autres.

Sur les très anciennes installations, il arrivera de rencontrer des modèles de débitmètres un peu plus « exotiques » qui ont eu le mérite de remplir leur fonction au mieux en fonction des technologies et des matériaux de l'époque. Ne les sous-estimons pas car ils ont été à la base de nombreuses applications qui ont permis d'améliorer les mesurages dès l'avènement de l'électronique de grande diffusion.

Ce chapitre ne traite pas des cas particuliers de débitmètres destinés à la détermination des consommations soumises à contrat et à facturation, notamment pour les comptages d'énergie hors de notre propos.

Les débitmètres décrits concernent principalement ceux installés sur des conduites fermées et sous pression hydraulique, et qui véhiculent une eau non chargée.

4.1 Le débitmètre massique à effet Coriolis

4.1.1 Principe de fonctionnement

Le principe de ce débitmètre repose sur la mesure de la déformation, plus ou moins importante selon le débit circulant, de deux tubes bloqués à leurs extrémités ou d'un tube en forme de U qui est excité en leur milieu. Des capteurs mesurent les mouvements des tubes dont l'amplitude est proportionnelle au débit.

Ce phénomène vibratoire est appelé « effet Coriolis » (Gustave Gaspard CORIOLIS, physicien français né en 1792, décédé en 1843).

Dans le schéma ci-dessous, la bobine excitatrice située en C soumet le segment AB à un mouvement oscillant. Les particules circulant à la vitesse V provoquent des forces de Coriolis sur les deux moitiés de tube dans des sens opposés, qui se superposent à l'oscillation générée en C. Ces forces sont directement proportionnelles au débit-masse et engendrent une distorsion du tube de mesure qui est mesurée par les capteurs inductifs placés de part et d'autre du point C.

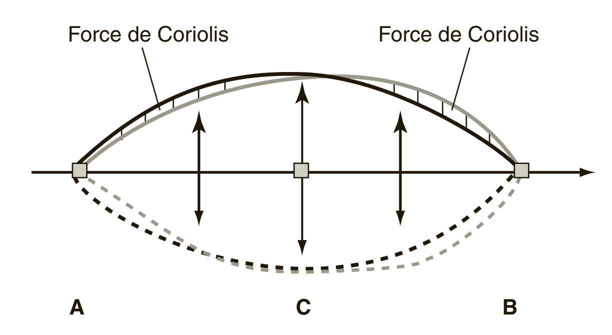


Figure 4.1 – Principe physique

Expression de la force de Coriolis :

$$\overrightarrow{F_C} = 2 \,.\, m \,.\, \overrightarrow{v_r} \,.\, \overrightarrow{\Omega}$$

avec :

$\overrightarrow{F_C}$ = force de Coriolis.

m = masse déplacée, en kg.

$\overrightarrow{v_r}$ = vitesse radiale dans un système en oscillation.

$\overrightarrow{\Omega}$ = vitesse angulaire.

La force de Coriolis dépend du débit massique, c'est-à-dire de la masse circulante et de sa vitesse, et d'une oscillation.

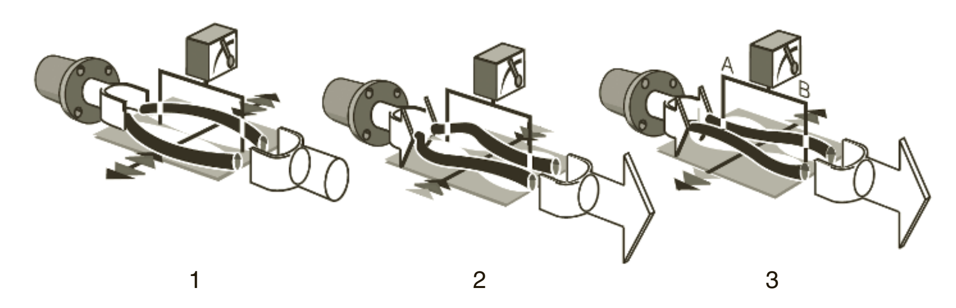


Figure 4.2 – Principe de fonctionnement du débitmètre à tubes parallèles (Doc. Endress + Hauser)

Le débitmètre à tubes parallèles constitue un diapason dont les deux branches oscillent en phase en l'absence de débit. Lorsque la masse (le débit) commence à circuler, l'oscillation se faire sentir d'abord en entrée des 2 tubes, ce qui a pour effet de les mettre en opposition de phases. Puis la masse est accélérée en sortie.

Le déphasage est directement proportionnel au débit massique. Les oscillations des 2 tubes transformés en « cordes vibrantes » sont ressenties par des capteurs de force situés en entrée et en sortie et converties en signal vers le processeur.



Figure 4.3 – Débitmètre Coriolis à tubes parallèles (Doc. KROHNE)

Sur ce principe d'exploitation de la force de Coriolis, il existe aussi des débitmètres en forme de U, dit « capteur à boucle oscillante ».

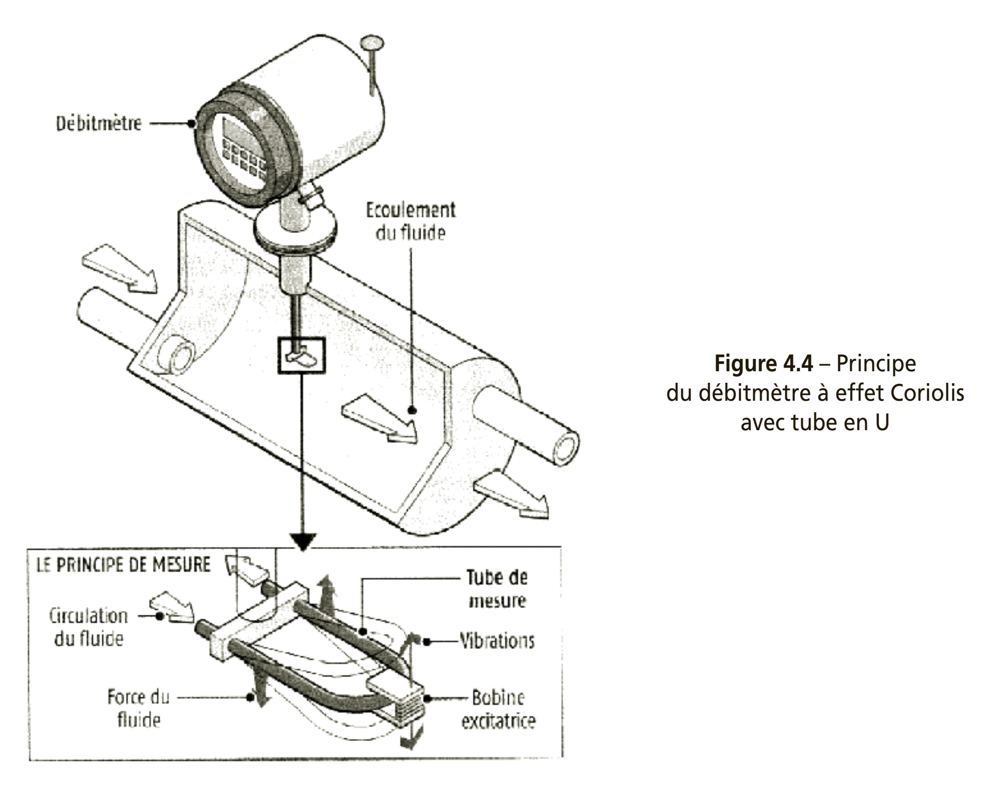


Figure 4.4 – Principe du débitmètre à effet Coriolis avec tube en U

Le fluide circule dans le tube dont le coude est muni d'une bobine excitatrice qui engendre un déplacement alternatif. La rotation Ω autour de l'axe OO' du plan de raccordement des deux tubes engendre la force de Coriolis qui a pour effet de déformer les deux branches selon un angle de torsion θ.

L'angle θ est mesuré par des capteurs dont les signaux sont transmis au processeur.

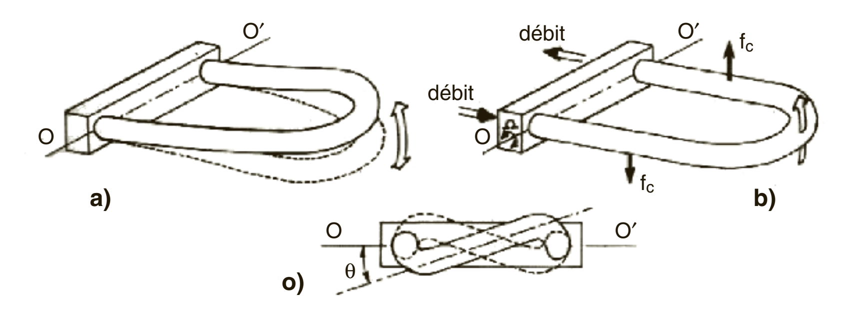


Figure 4.5 – Principe d'oscillation et de déformation du tube en U (Doc. Dunod)

À l'équilibre, on a :

$$Q_m = \frac{k.\theta}{2.\Omega.L.d}$$

Les explications sur les différentes forces exercées qui amènent à cette équation sont détaillées en annexe 5.1.

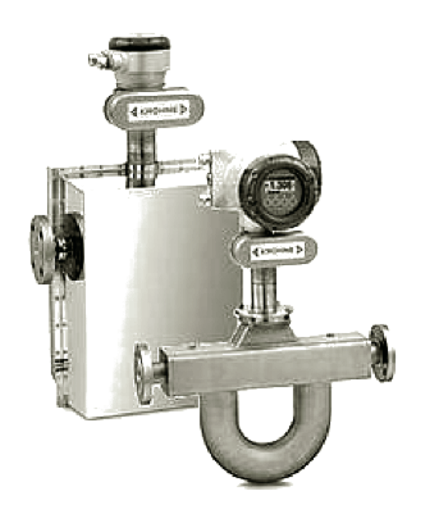


Figure 4.6 – Débitmètre Coriolis à tubes en U (doc. KROHNE)

4.1.2 Principe de mesurage

Normalement installé, on peut estimer la précision de mesure du débit entre 0,2 et 0,4 % de la pleine échelle.

Il est possible de placer le débitmètre à effet Coriolis dans plusieurs positions :

- en position horizontale, alimentation de gauche à droite ❶
- en position verticale avec écoulement de bas en haut ❷
- en position oblique avec écoulement ascendant ❸
- en position verticale avec bi-passe de calibrage du zéro ❺

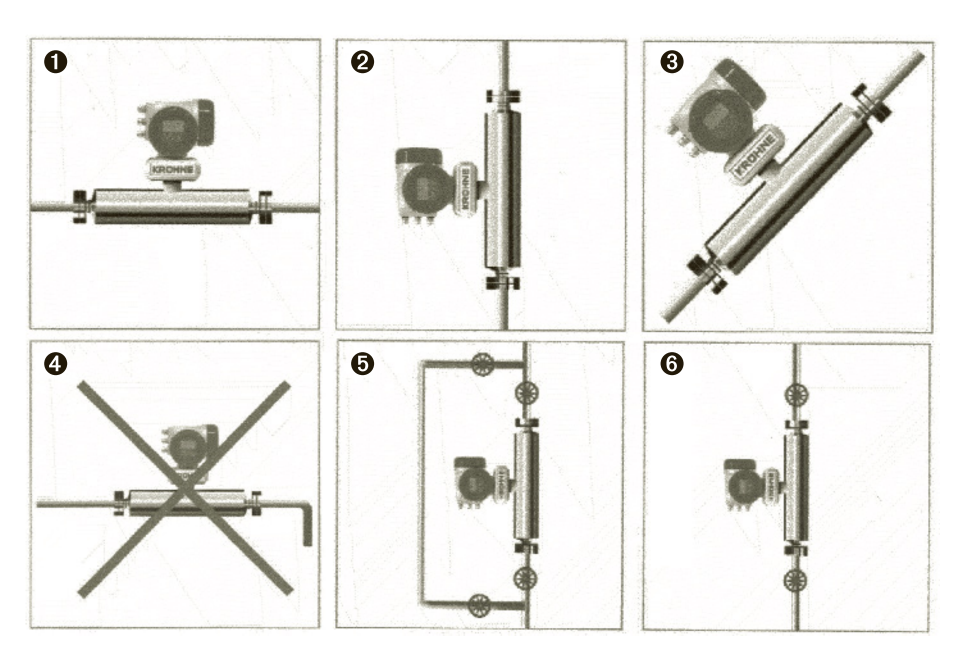


Figure 4.7 – Positionnement d'un débitmètre à effet Coriolis (doc. KROHNE)

– en position verticale avec vanne d'isolement en aval pour empêcher un écoulement inverse lorsque la pompe de circulation s'arrête ❻.
– la position ❹ est à proscrire car la chute verticale en aval du compteur peut provoquer un siphonnage de la canalisation avec les risques d'erreur que cela entraîne.

Il est nécessaire de prévoir environ 15D en amont et 5D en aval.
Il n'est pas nécessaire de prévoir une longueur droite en amont supérieure à D.
La température de fonctionnement peut atteindre 200 °C, à voir avec le constructeur en fonction de la nature des tubes, pour 400 bars environ, voire jusqu'à 900 bars pour les petits diamètres dans le cas du constructeur F.C.I.

4.2 Le débitmètre massique thermique

4.2.1 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement repose sur la présence de deux sondes à résistance de platine placées sur la paroi interne de la canalisation. La sonde amont est soumise exclusivement à la température du fluide t pendant que la sonde aval est échauffée pour maintenir la température $(t + x)$ constante. La puissance thermique nécessaire pour conserver cet équilibre est proportionnelle au débit massique et aux propriétés du fluide circulant.

$$Q_m = \frac{P}{C_p.\Delta t}$$

avec :
q_m = débit massique, en kg/s.
P = puissance thermique, en W.
C_p = chaleur massique du fluide à pression constante, en J/kg .°C.
Δt = écart de température des sondes, égale à x, en °C.

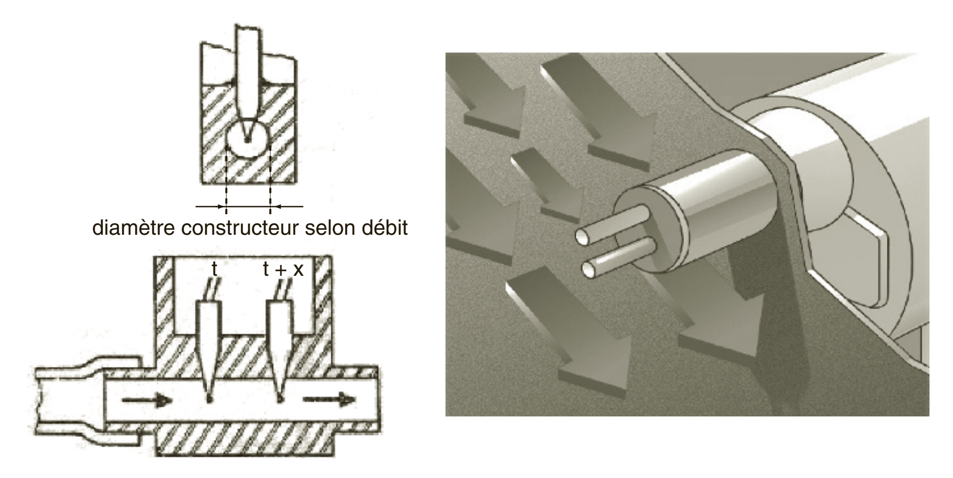


Figure 4.8 – Principe de mesure du débitmètre massique thermique (d'après doc. Engineering Mesures)

Ce débitmètre peut être conçu pour être du même diamètre que la canalisation sur laquelle on souhaite l'installer. Selon, le diamètre, il peut être à brides de raccordement ou à raccords filetés.

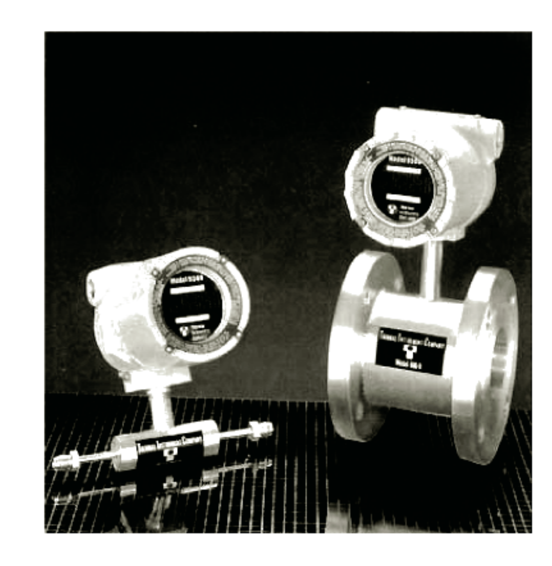


Figure 4.9 – Débitmètre massique thermique (doc. Thermal Flow)

Pour les diamètres supérieurs à 50 mm, il peut être à insertion :



Figure 4.10 – Débitmètre massique thermique à insertion (doc. Engineering Mesures)

Les deux sondes sont protégées contre toute agression du fluide transporté. Ce type de compteur peut être utilisé pour des liquides (eau, huile, carburant…), liquides chargés, des gaz, des matières molles, etc.

De part sa conception, le débitmètre massique thermique ne modifie pas le débit de circulation du fluide.

La précision peut être de ± 0,5 % de la pleine échelle de mesure ou à ± 1 % de la valeur mesurée, selon les constructeurs, avec un débit minimal de 0,0015 litre/heure (ramené à une masse volumique de l'eau à 1 000 kg/m^3).

Pour les forts débits de liquides propres et de gaz notamment, un autre principe utilise un montage en dérivation permet de limiter la puissance thermique à

fournir. La difficulté consiste à maintenir un flux laminaire pour obtenir des pertes de charges le plus linéaires possible afin de pouvoir déterminer précisément le débit circulant dans le bi-passe appelé « capillaire ». Le débit total est déterminé en fonction du rapport de débit propre au débitmètre entre le capillaire et la canalisation principale.

À la différence du modèle précédent, c'est le capillaire de quelques millimètres seulement de diamètre, qui est entouré d'un élément chauffant amenant le fluide à une température constante T2 égale à T1 + *x*.

T1 est la température d'origine du fluide en amont, et la valeur de x est fixée par le constructeur, généralement 30 °C au-dessus de la température ambiante. Lorsque le débit est nul, T1 = T2.

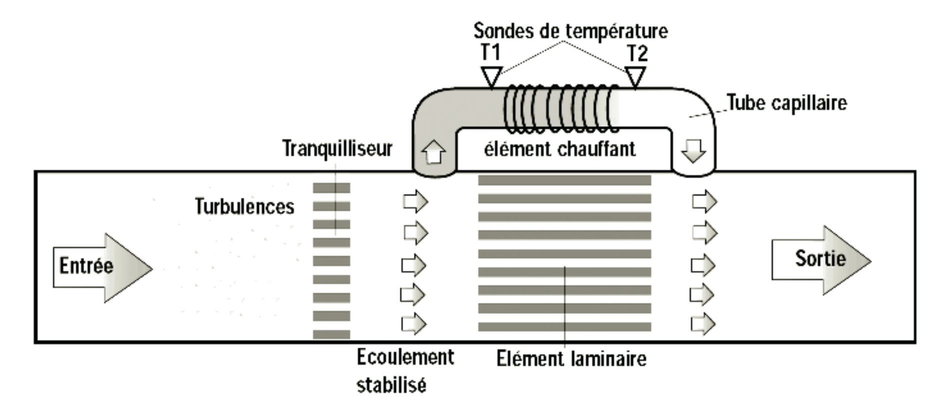


Figure 4.11 – Principe de fonctionnement du débitmètre massique thermique à capillaire (doc. Mesures 731)

Un troisième type de débitmètre massique thermique consiste à insérer l'élément chauffant et une sonde de température directement dans la canalisation sous la forme d'une manchette étalonnée. La puissance thermique nécessaire au maintien d'une température constante est directement proportionnelle au débit massique selon la loi de Kings.

Ce procédé de débitmètre thermique à insertion se comporte en fait comme un anémomètre à fil chaud (voir partie A – « Les mesures de débits aérauliques ») avec toutes les contraintes de flux à maîtriser.

4.2.2 Principe de mesurage

Normalement installé, on peut estimer la précision de mesure du débitmètre massique thermique à 1 % de la pleine échelle.

Ce type de débitmètre permet de mesurer des débits importants. Il convient de se rapprocher d'un constructeur pour le dimensionner. Par contre, sa perte d charge est négligeable ;

Le débitmètre massique thermique est indépendant de la nature du fluide, de sa pression, de sa température, de sa viscosité et de sa conductivité.

Il est utilisable pour des liquides et les gaz.

4.3 Le débitmètre volumique électromagnétique

La conductivité électrique des liquides est une propriété utilisée par les débitmètres électromagnétiques.
Cette conductivité s'exprime en S/m (Siemens/mètre, du nom de l'ingénieur allemand Werner von SIEMENS, né en 1816, décédé en 1892), ou plus généralement en µS/cm égal à 10^8 S/m.
Pour mémoire, la conductivité est l'inverse de la résistivité qui s'exprime en Ω/cm.
Par convention, la conductivité d'un liquide est donnée pour une température de 20 °C. On peut donner comme exemple de conductivités de liquide :

– pour l'eau pure = 0,042 µS/cm ;
– pour l'eau potable = 200 µS/cm et plus selon la provenance ;
– pour l'eau contenant 1 mg/l de sel dissous = 2,5 µS/cm.

4.3.1 Principe de fonctionnement

Le principe de ce débitmètre volumique est basé sur le principe de Faraday (du nom du physicien anglais Michael FARADAY, né en 1791 et décédé en 1897, à qui on doit l'unité de capacité du condensateur qui s'exprime en Farad) : si un conducteur (dans notre cas, c'est le fluide circulant), animé d'une vitesse V à l'intérieur d'un tube de diamètre D électriquement isolé, traverse un champ magnétique B, une tension U est alors induite dans ce liquide et captée par deux électrodes de mesure.

$$U = k \cdot B \cdot v \cdot D$$

$$\Leftrightarrow v = \frac{U}{k.B.D}$$

avec :
U = tension, en Volt.
k = constante du capteur.
B = intensité du champ magnétique, en Tesla.
v = vitesse d'écoulement, en m/s.
D = distance entre les deux électrodes, DN du tube en m.

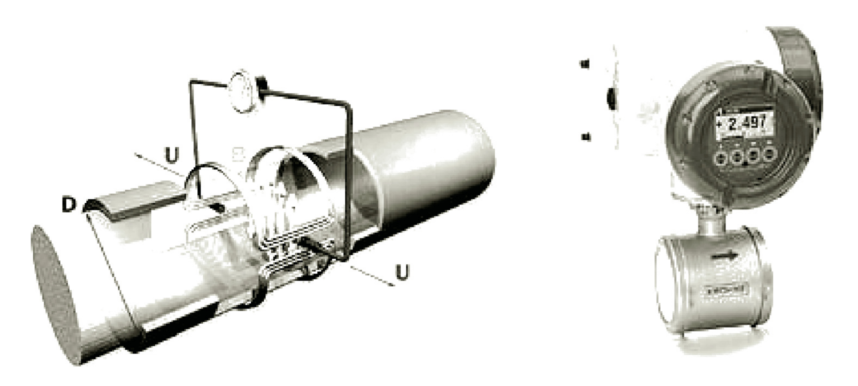
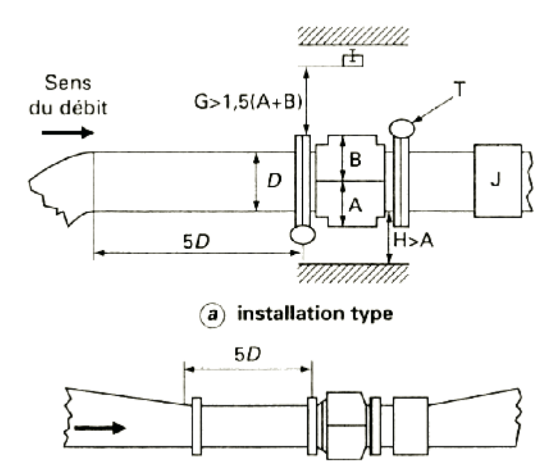


Figure 4.12 – Principe de fonctionnement et débitmètre électromagnétique (doc. KROHNE)

Pour l'anecdote, citons que Michael Faraday tenta en 1832 de mesurer la vitesse du courant de la Tamise par induction magnétique. Il disposa une électrode sur chaque rive opposée pour capter la tension induite par le mouvement de l'eau dans le champ magnétique terrestre. Mais cette première application échoua en raison notamment à des phénomènes électrochimiques parasites sur les électrodes.
Le principe du débitmètre électromagnétique est particulièrement adapté pour les mesures avec des liquides conducteurs (> 5 µS/cm) et pour les débits de métaux liquides. Il n'est pas utilisable pour les gaz.
La mesure est indépendante du profil d'écoulement ainsi que des autres caractéristiques du fluide telles que la pression, la température, la viscosité, la densité, la conductivité électrique, et peu influencé par l'encrassement des électrodes.
Il est d'ailleurs possible de nettoyer les électrodes par ultrasons ou par démontage (si le process le permet).
Comme avantages, on peut citer que le débitmètre électromagnétique ne perturbe pas le débit, qu'il est utilisable pour tous les fluides conducteurs même agressifs et/ou corrosifs, et cela pour des canalisations de quelques millimètres à 2 mètres de diamètre.
Afin d'éviter la polarisation des électrodes, elles sont alimentées en courant alternatif.

4.3.2 Principe de mesurage

Normalement installé, on peut estimer la précision de mesure du débit entre 0,5 et 2 % de la valeur mesurée.
Par contre, des précautions sont à respecter pour limiter les erreurs de mesurage.



(b) **installation avec convergent-divergent en site horizontal, pour liquide boueux**

A et B dimensions du débitmètre par rapport à l'axe
G cote utile à la manutention (hauteur par rapport au plafond)
H cote pour le démontage
J joint glissant ou joint de dilatation
T tresses

Figure 4.13 – Distances à respecter

La plage de température d'utilisation est de 60 °C à 180 °C, pour 250 bars maximum.

4.4 Les débitmètres volumiques à ultrasons

4.4.1 Principes de fonctionnement

Les débitmètres volumiques à ultrasons, à montage externe ou interne, ne sont apparus sur le marché sous forme industrielle que vers 1970. L'amélioration des circuits intégrés a permis d'aboutir à des réalisations à la fois précises et commercialement viables.

Son grand avantage est de pouvoirs effectuer des mesures non intrusives, notamment pour les modèles portables.

On ne peut l'utiliser pour mesurer des débits de gaz que depuis l'année 2003 et en montage externe uniquement.

On distingue le modèle à temps de transit qui est utilisable pour des débits de fluides non chargés, par opposition au type à effet Doppler (du nom du physicien allemand Christian DOPPLER, né en 1803, décédé en 1853) qui ne fonctionne qu'avec des fluides chargés, voire très chargés. On entend par fluide chargé un fluide contenant des particules solides et/ou gazeuses.

■ Principe de fonctionnement du débitmètre à temps de transit

Une onde ultrasonore est une vibration de fréquence élevée, mettant en mouvement les molécules de part et d'autre de leur position d'équilibre et se propageant dans les milieux élastiques.

Les fréquences employées en débitmétrie se situent toujours au-delà de 100 kHz. La plage la plus utilisée est comprise entre 200 kHz et 5 MHz. Il est donc impropre de parler d'ondes acoustiques, bien que ce terme soit très courant.

Les différents milieux élastiques (solides, liquides, gazeux) se comportent différemment vis-à-vis des ondes ultrasonores. Leur vitesse de propagation et l'absorption sont deux caractéristiques essentielles de chaque.

La vitesse de propagation ou célérité C est liée à la densité et au module d'élasticité. Pour les liquides usuels, C est compris entre 1 000 et 1 600 m/s. Pour les gaz, elle est voisine de 400 m/s. Il est important de noter que la vitesse de propagation varie, pour un milieu donné, avec la température et la pression.

Par exemple, pour l'eau, la célérité C est (en m/s) :

$$C = 1\ 557 - 0{,}024\ 5\ (74 - t)^2$$

avec t : température, en °C.

La célérité C du son dans l'eau à 25 °C est de 1 497 m/s à la pression atmosphérique et de 1 556 m/s à 80 bars. Pour l'eau à 175 °C pressurisée, elle est de 1 416 m/s à 45 bars et de 1 427 m/s à 80 bars.

Pour comparaison, la célérité d'une onde dans l'air à 25 °C est de 345 m/s, et entre 5 310 et 5 740 m/s dans l'acier.

De façon générale, l'absorption au sein d'un milieu homogène est proportionnelle au carré de la fréquence et à la viscosité. L'atténuation subie par une onde ultraso-

nore peut être augmentée par la présence de particules solides ou gazeuses. Dans les liquides chargés, l'atténuation est d'autant plus forte que la dimension des particules est grande par rapport à la longueur d'onde, la nature de la charge constituant également un facteur important. L'atténuation devenant plus importante lorsque l'impédance acoustique de la particule s'éloigne de celle du milieu porteur, c'est pour cela que l'on n'utilise pas ce type de débitmètre en présence de fluide chargé ou contenant des bulles de gaz.
L'impédance acoustique d'un milieu se définit comme étant le produit de sa masse volumique par la vitesse du son. On comprendra aisément que les bulles de gaz au sein d'un liquide deviennent rapidement absorbantes. Si, de plus, leur taille se rapproche de la longueur d'onde, elles constituent rapidement un réflecteur parfait.
Les propriétés auxquelles doivent satisfaire les capteurs utilisés en débitmétrie varient suivant qu'ils sont ou non au contact du fluide.
Les capteurs externes travaillent évidemment à la même température que le fluide à mesurer et doivent pouvoir s'appliquer parfaitement à la surface extérieure de la conduite. les capteurs placés au contact du fluide sont, en plus, soumis à l'agressivité du fluide et à sa pression.
De façon générale, un capteur est constitué d'une céramique munie de ses deux connexions électriques, l'ensemble étant soit moulé dans une résine époxyde, soit collé à l'intérieur d'un doigt de gant métallique.
La limite de température provient le plus souvent de la nature des produits d'enrobage ou des colles utilisées. Elle se situe aux alentours de 150 °C, et jusqu'à 400 °C avec des guides d'ondes et des matériaux couplant type « feuille d'or » ou « feuille d'argent ».

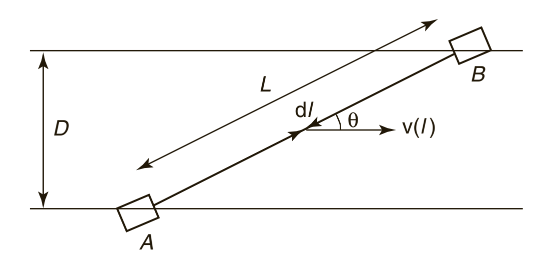


Figure 4.14 – Principe de la mesure de vitesse de fluide

La vitesse moyenne est donnée par :

$$\bar{V} = \frac{C^2.\Delta T}{2.L.\cos\theta}$$

avec :
L = distance entre A et B.
V = vitesse du fluide en chaque point de la ligne A et B.
θ = angle formé par la direction de l'écoulement et la ligne AB.
C = vitesse de propagation du son dans le fluide au repos.
ΔT = différence de temps de parcours.

On peut rencontrer des débitmètres à capteurs externes ou à capteurs internes :

Les capteurs sont externes à la canalisation (« clamp-on type »)

Cela permet d'avoir du matériel de mesure à poste fixe sur l'installation, ou d'utiliser un matériel portable occasionnellement pour effectuer des contrôles ponctuels par exemple.
Ce type de capteurs est appliqué à l'extérieur des conduites. Les ultrasons traversent donc la conduite avant de se propager dans le liquide.
Pour des raisons d'adaptation acoustique, cette méthode peut être utilisée pour la mesure des débits gazeux mais sous certaines conditions de pression minimum notamment.
À l'abri de toutes les agressions dues au fluide, cette disposition n'en présente pas moins un inconvénient majeur. En effet, quelle que soit la technique de mesure utilisée, la sensibilité d'un appareil dépend de la connaissance de l'angle θ du faisceau acoustique par rapport à l'axe du fluide, ou de cet angle et de la distance d séparant les points d'émergence du faisceau à l'intérieur de la canalisation. Ces paramètres varient avec la température et la nature du fluide. D'autre part, il n'est plus possible d'utiliser la mesure du temps de parcours moyen pour effectuer la correction de célérité.
Les précisions atteintes par ces appareils sont de l'ordre de 1 % à 5 % de la mesure.
Une contrainte apparaît en plus lorsqu'il s'agit de canalisation calorifugée car il faudra nécessairement déposer le matériau isolant et gratter la peinture antirouille pour faciliter le contact des capteurs sur l'acier.
S'il s'agit de canalisation d'eau glacée, il faudra nécessairement éviter que la condensation qui se formera sur la tuyauterie n'engendre des désordres.

Les capteurs sont internes à la canalisation

Cette disposition favorise évidemment la transmission acoustique.
Ceci suppose que leur installation est d'origine et que le constructeur de l'appareil est été informé de la nature exacte du fluide véhiculé.
L'autre inconvénient réside dans le fait que la présence des capteurs à l'intérieur de la canalisation génère des perturbations dans l'écoulement du fluide. Il conviendra aussi de se rapprocher de la notice du constructeur pour vérifier si ce paramètre fait l'objet d'une intégration dans une correction du résultat de mesure.
C'est pour cela que certains constructeurs proposent dès l'origine des manchettes calibrées pour tenir compte des perturbations inhérentes à la présence des capteurs internes.
Enfin, la nature corrosive ou non et la température du fluide sont des paramètres à considérer.
On peut trouver des débitmètres à temps de transit avec sondes opposées (montage direct) ou avec les sondes sur la même génératrice (montage reflex simple, appelé aussi en « V ») (fig. 4.15).
Il existe aussi des montages en multi-reflex avec les sondes du même côté (mode en « W ») et en opposition (mode en « N ») pour les canalisations de très faible diamètre (de l'ordre de 15 mm) (fig. 4.16).

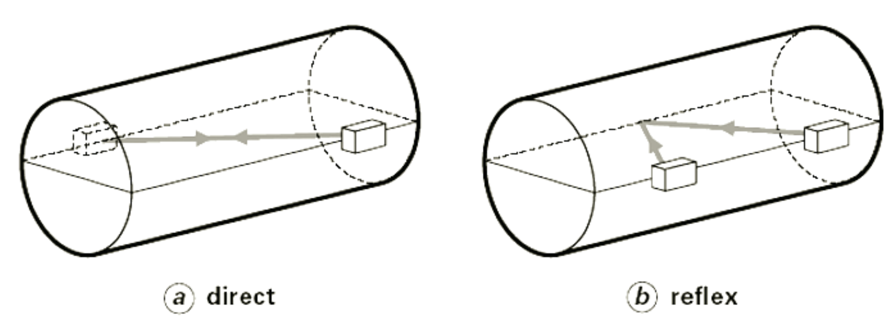


Figure 4.15 – Sondes placées en mode direct ou en reflex en V (doc. T.I.)

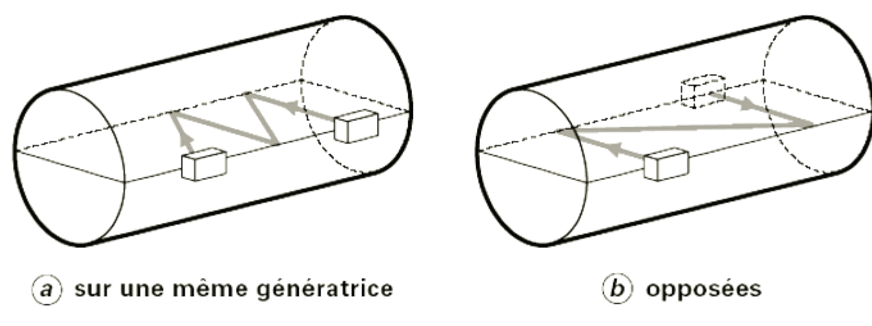


Figure 4.16 – Sondes placées en mode multi reflex (doc. T.I.)

Enfin, on peut placer les sondes dans des plans diamétraux et, pour limiter l'incertitude, on peut utiliser deux paires de capteurs :

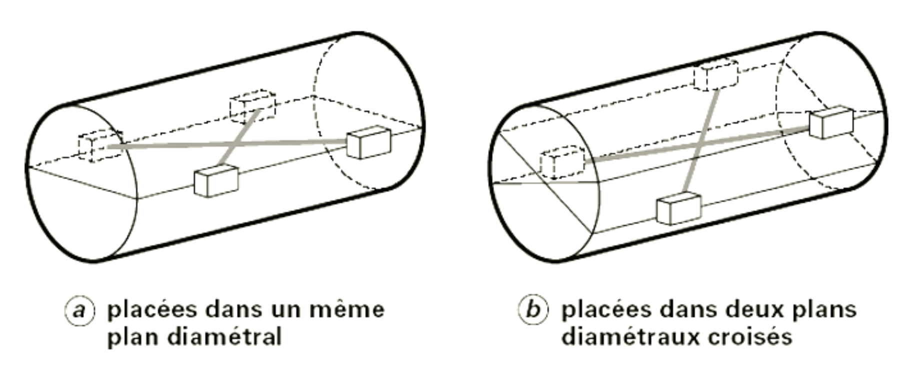


Figure 4.17 – Sondes placées dans des plans diamétraux (doc. T.I.)

■ Principe de fonctionnement du débitmètre à effet Doppler

Utilisant les réflexions des ondes acoustiques sur les particules présentes au sein du fluide en mouvement, ces appareils ne peuvent fonctionner que sur des fluides chargés à l'état d'émulsion ou contenant des bulles de gaz.

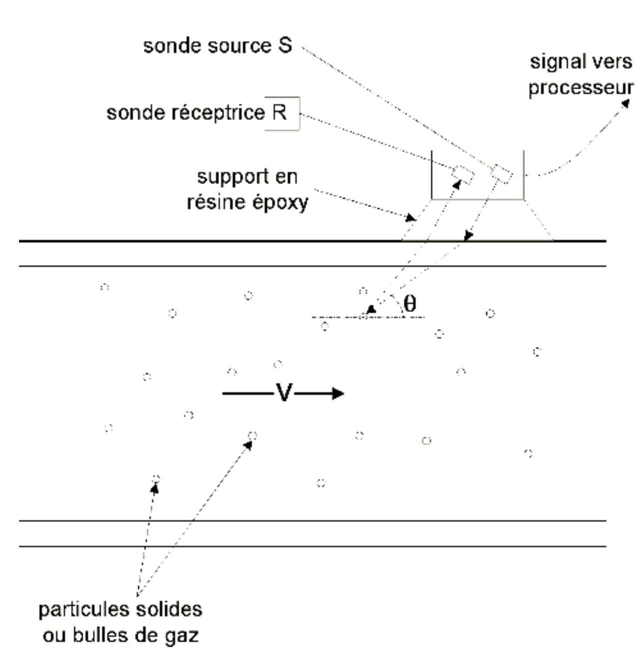


Figure 4.18 – Principe du débitmètre à effet Doppler

Deux sondes S et R sont disposées suivant la figure ci-dessus. La sonde S émet un signal sinusoïdal continu de fréquence F_S à l'intérieur de la conduite. Les particules contenues dans le fluide en mouvement réfléchissent les signaux vers la sonde R qui fonctionne en récepteur. Le signal recueilli par la sonde R possède une fréquence F_R telle que :

$$\frac{F_R - F_S}{F_S} = \frac{\Delta F}{F_S} = \frac{2V\cos\theta}{C}$$

avec :
ΔF = battement du signal entre la source et le récepteur.
F_S = fréquence du signal source.
F_R = fréquence du signal récepteur.
V = vitesse de circulation du fluide.
θ = angle que fait le faisceau ultrasons source avec le vecteur vitesse.
C = vitesse du son dans le fluide .

Les explications sur les différents phénomènes qui amènent à cette équation sont détaillées en annexe.
Le fait de ne pas connaître la position des particules dans l'espace augmente l'incertitude de 5 % à 10 % de la valeur mesurée.

4.4.2 Principe de mesurage

■ Principe de mesurage du débitmètre à temps de transit

Dans tous les cas de figure, il sera préférable de placer les capteurs sur des génératrices



horizontales plutôt que verticales afin, d'une part, de ne pas influencer la mesure sur les dépôts qui ont pu se former au fond de la tuyauterie, et d'autre part, que la condensation éventuelle ne s'écoule sur le capteur inférieur.

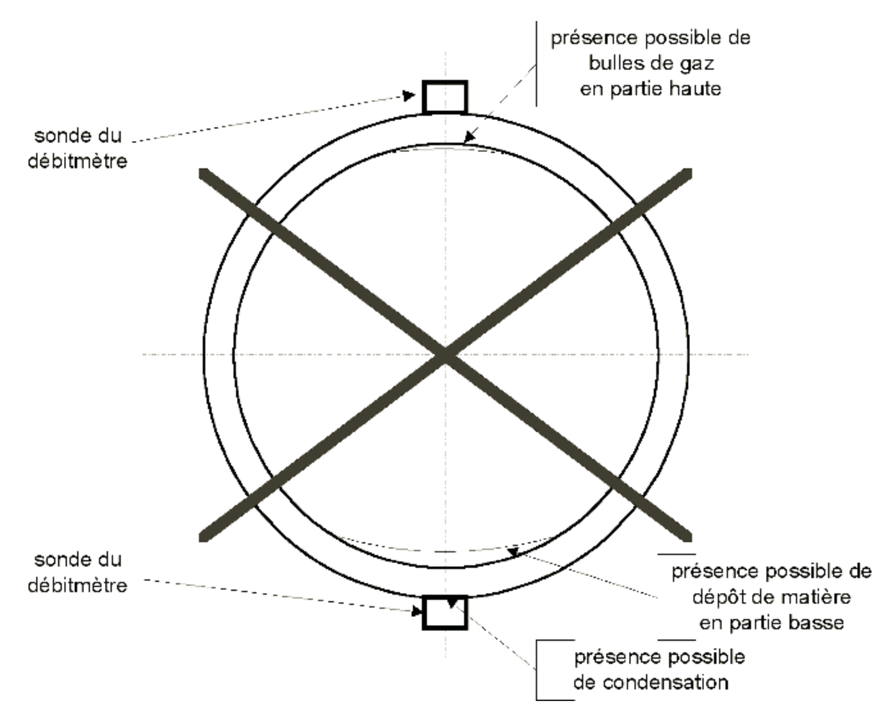


Figure 4.19 – Positions des capteurs à éviter

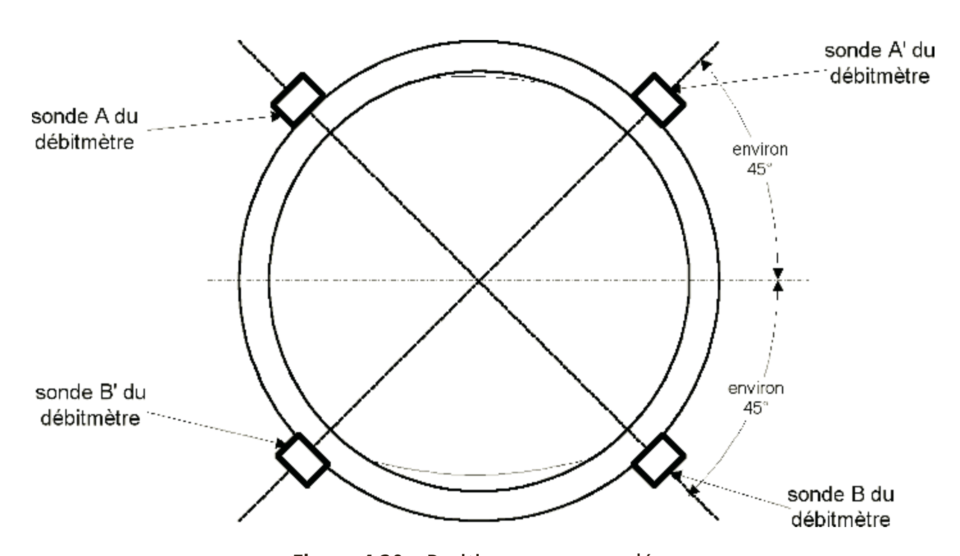


Figure 4.20 – Positions recommandées pour les capteurs A-B ou A'-B'

En mode reflex : L ≥ 30.D
En mode direct : L ≥ 40.D

En mode reflex : L ≥ 3.D
En mode direct : L ≥ 5.D

En mode reflex : L ≥ 10.D
En mode direct : L ≥ 15.D

En mode reflex : L ≥ 3.D
En mode direct : L ≥ 5.D

En mode reflex : L ≥ 10.D
En mode direct : L ≥ 15.D

En mode reflex : L ≥ 3.D
En mode direct : L ≥ 5.D

En mode reflex : L ≥ 15.D
En mode direct : L ≥ 20.D

En mode reflex : L ≥ 3.D
En mode direct : L ≥ 5.D

En mode reflex : L ≥ 15.D
En mode direct : L ≥ 20.D

En mode reflex : L ≥ 5.D
En mode direct : L ≥ 8.D

En mode reflex : L ≥ 30.D
En mode direct : L ≥ 40.D

En mode reflex : L ≥ 3.D
En mode direct : L ≥ 5.D

Figure 4.21 – Positions à respecter (doc. Ultrafux)

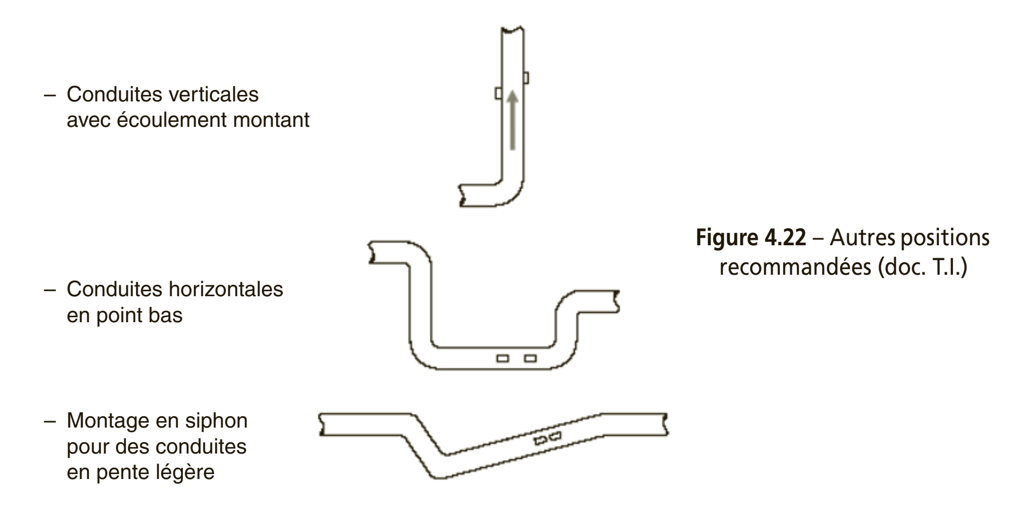


Figure 4.22 – Autres positions recommandées (doc. T.I.)

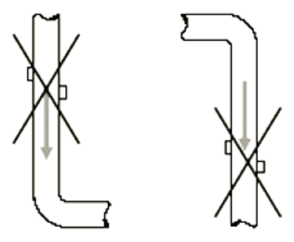


Figure 4.23 – Positions déconseillées (doc. T.I.)

Conduite verticale avec écoulement descendant car la canalisation peut ne pas être complètement en charge.

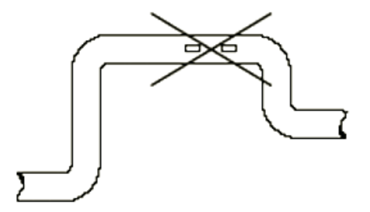


Figure 4.24 – Autre position déconseillée (doc. T.I.)

Canalisation formant un point haut avec présence possible d'air ou de gaz.

■ **Principe de mesurage du débitmètre à effet Doppler**

Le battement de fréquence ΔF entre le signal transmis par la source S et celui reçu par récepteur R est permis grâce aux particules ou les bulles présentes dans le fluide.
La vitesse de circulation V est compatible jusqu'à 15 m/s environ.
La précision à attendre de ce type de débitmètre est de l'ordre de 5 % de la valeur mesurée, si la nature du fluide est bien connue pour paramétrer la vitesse de propagation du son.
Il est nécessaire de prévoir environ 15D en amont et 5D en aval.
La plage de température de fonctionnement est de 5 à 260 °C, et de 420 bars maximum.
Comme le débitmètre à ultrasons, le débitmètre à effet Doppler présente l'avantage de ne pas être intrusif dans la conduite et de ne générer aucunes pertes de charge.

4.5 Les débitmètres volumiques à effet Vortex

Aussi bien dans une gaine aéraulique (voir chapitre précédent) que dans une conduite véhiculant un liquide, lorsqu'un corps est immergé dans un fluide en mouvement, il se produit des tourbillons dans son sillage. Ces mouvements sont appelés « tourbillons de Von Karman » ou « effet Vortex » (Vortex signifie tourbillon en anglais). La fréquence de détachement des tourbillons est proportionnelle à la vitesse de circulation (voir les figures 1.14 et 1.16 dans la partie A).
Le nombre de Strouhal S_t est un nombre sans dimension décrivant les mécanismes de circulation oscillante :

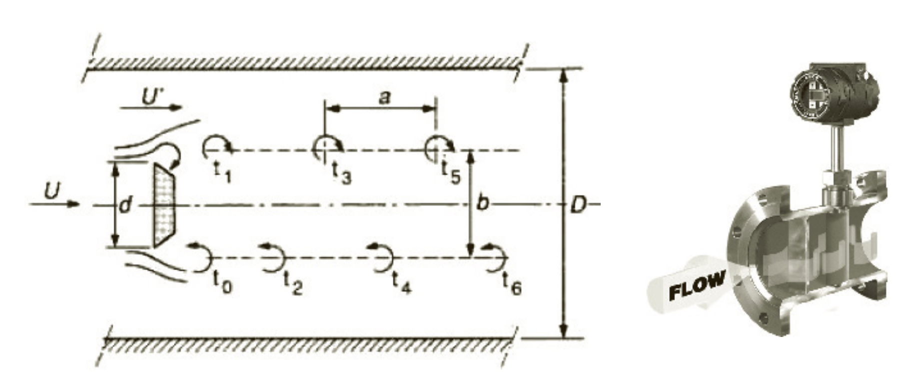


Figure 4.25 – Principe du débitmètre à effet Vortex (doc. T .I. et Egineering Mesures)

$$S_t = \frac{f \cdot d}{v}$$

avec :

f = fréquence détachement des tourbillons en Hz.

d = diamètre de l'élément perturbateur, en m.

v = vitesse de l'écoulement, en m/s.

On peut en déduire :

$$v = \frac{f \cdot d}{S_t}$$

On remarque dans la représentation schématique précédente qu'il apparaît deux lignes de courant de part et d'autre de l'obstacle, constituées chacune de deux couches dites de « cisaillement » pour donner naissance aux tourbillons t_0, t_2, t_4…et t_1, t_3, t_5…Les tourbillons de chaque ligne tournent dans des sens différents et ont un entraxe *a* constant suivant deux droites parallèles distantes de *b*.

On peut lire à l'aide le graphe suivant que St est quasi indépendant du nombre de Reynolds après la valeur 10 000 :

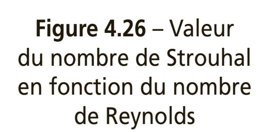
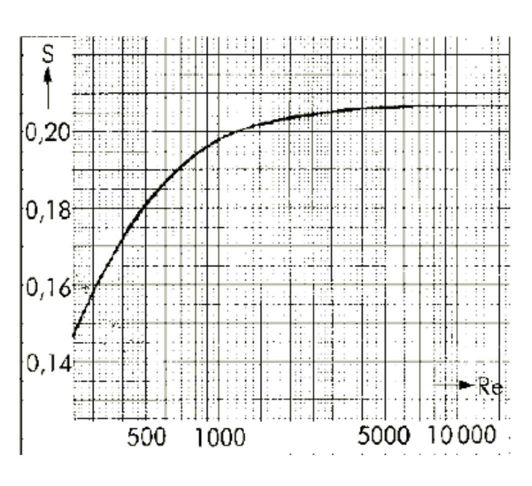


Figure 4.26 – Valeur du nombre de Strouhal en fonction du nombre de Reynolds



Selon le type de capteur, les fréquences typiques de détachement sont :

– 63 Hz → 1 m/s
– 1 450 Hz → 20 m/s
– 2 100 Hz → 40 m/s

Dans le cas du débitmètre à effet Vortex, les tourbillons sont détectés par ultrasons qui sont émis entre un émetteur et un récepteur d'ultrasons, ou d'un capteur piézo. Lorsqu'un fluide passe sur un corps perturbateur, des tourbillons se forment sur les côtés et se détachent sous l'effet de l'écoulement d'une manière plus ou moins sensible selon le nombre de Reynolds *Re*. Comme on l'a vu précédemment, la mesure est linéaire quand *Re* est supérieur à 20 000.

On peut citer deux types de débitmètre utilisant ce phénomène ; le débitmètre piézo-précessif et le débitmètre à effet Coanda décrits ci-après.

4.5.1 Principes de fonctionnement

■ Principe de fonctionnement du débitmètre piézo-précessif

Le mode de fonctionnement repose sur l'effet Vortex créé par un écoulement giratoire dans un cylindre. La mise en rotation de l'écoulement par des aubes directrices provoquent l'apparition de zone de courant hélicoïdal dont la fréquence des tourbillons est mesurée par un élément sensible qui peut être une thermistance ou un capteur de pression.

La relation entre le nombre de tourbillons et la vitesse est linéaire.

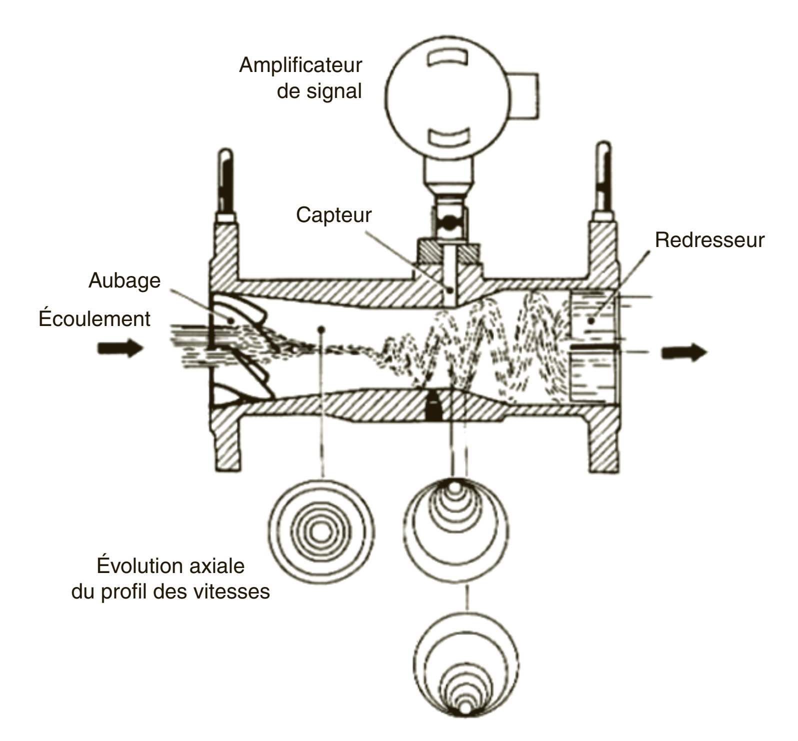


Figure 4.27 – Principe de fonctionnement du débitmètre piézo-précessif en ligne (doc. T.I. d'après Fisher et Porter)

Le débit mesuré étant volumique, il y a lieu de compenser en température et en pression pour ramener le résultat aux conditions normales.

En raison de sa perte de charge relativement importante, ce débitmètre doit faire l'objet d'une étude avec le constructeur.

Un de ses avantages consiste en la longueur droite nécessaire en amont relativement faible (3D) et en aval (D).

On peut également trouver ce type de débitmètre mais avec une entrée de fluide tangentielle dans un cylindre pour créer le phénomène de giration, et avec une sortie axiale où est mesurée la fréquence des tourbillons.

■ Principe de fonctionnement du débitmètre à effet Coanda

Le principe de fonctionnement de ce débitmètre repose sur le phénomène mis en avant par le physicien Henri COANDA (physicien roumain, né en 1886, décédé en 1972).

Lorsqu'un fluide s'écoule, il a tendance à s'« accrocher » à la paroi, même en présence de la gravité. Faire par exemple l'expérience, lors de lavage de la vaisselle, de faire s'écouler de l'eau sur la paroi extérieure d'une tasse ; l'eau ne parcourt pas seulement la demie circonférence du récipient mais continue sa course pour quasiment remonter sur encore quelques degrés d'angle.

De même, pour bien comprendre l'influence du débit, on peut remarquer qu'en utilisant une théière, le résultat est différent suivant l'inclinaison du bec verseur, c'est-à-dire selon le débit ; à fort débit, le thé s'écoule normalement dans la tasse, à très faible débit, il y a du thé qui s'écoule le long du bec verseur. Le débit contribue à l'accrochage de la couche limite. C'est ce que l'on appelle l'effet Coanda.

C'est ce principe qui est utilisé dans le débitmètre à effet Coanda. Le flux entrant dans l'appareil s'accroche à une paroi, ce qui a pour effet de décrocher le jet de celle-ci et de l'accrocher à la paroi opposée. Cela forme une oscillation permanente d'une paroi à l'autre.

En fonction de la vitesse d'entrée et de la géométrie interne de la chambre du débitmètre, la période de cette oscillation va être perçue par un capteur situé sur une paroi et transformée en signal vers le processeur. Le phénomène périodique fait passer le débit par la valeur nulle.

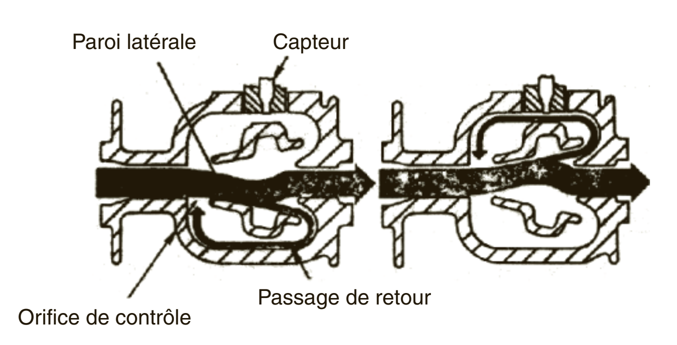


Figure 4.28 – Coupe d'un débitmètre à effet Coanda (doc T.I.)

Le capteur peut être une thermistance gainée pour résister à l'abrasion, ou une sonde de pression piézoélectrique encapsulée.

4.5.2 Principes de mesurage

Des précautions sont à observer quant à la position du débitmètre par rapport aux obstacles sur les canalisations en amont et/ou en aval, sauf pour le type piézoprécessif. Si, pour des raisons techniques, les distances préconisées ne pouvaient pas être respectées, la mise en place de stabilisateur de flux du même type que ceux décrit dans le chapitre Aéraulique devra être envisagée.

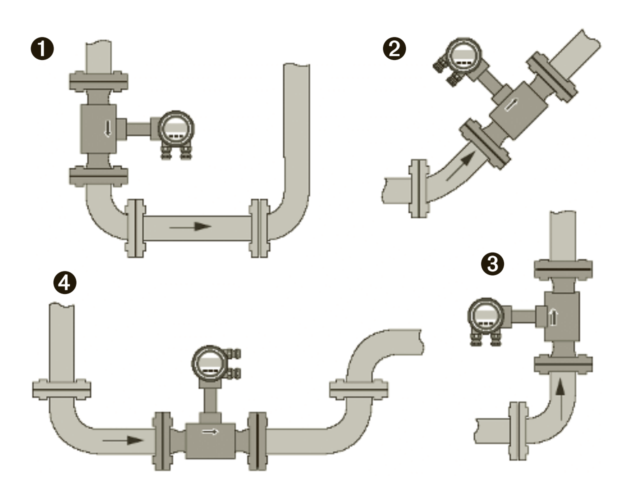


Figure 4.29 – Montage possible en respectant les longueurs droites (doc. KROHNE)

Montage possible en amont d'un coude (1), dans une conduite ascendante diagonale (2), sur une canalisation verticale (3) et en point bas d'une canalisation (4).

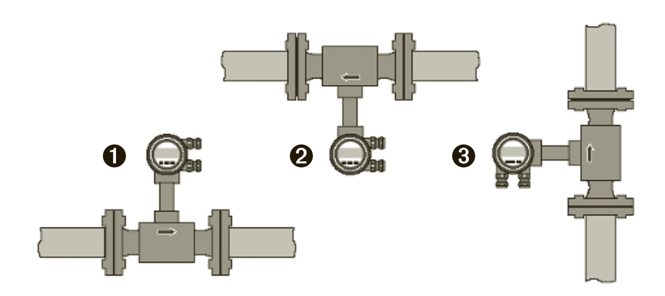


Figure 4.30 – Autres montages possible en respectant les longueurs droites (doc. KROHNE)

Au-dessus d'une canalisation (1) ou en dessous (2), sur une conduite verticale. À noter que la position 2 est à éviter en présence d'eau glacée afin qu'une condensation éventuelle ne vienne pas endommager le débitmètre.

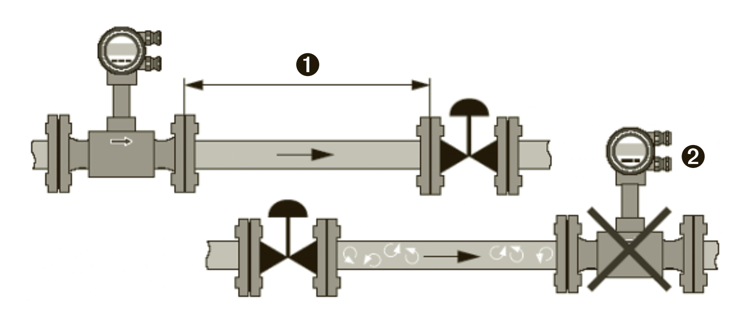


Figure 4.31 – Montage en fonction d'une vanne de régulation (doc. KROHNE)

Dans le cas de la figure 1, il faut respecter au moins 5 diamètres en amont de la vanne de régulation. La position 2 est à éviter sauf à respecter au moins 35D.

Entrée
Sortie
Convergent
15xDN
5xDN
Divergent
18xDN
5xDN
Coude 90°
ou pièce en T
20xDN
5xDN
2 × coudes 90°
25xDN
5xDN
2 × coudes 90° en 3D
40xDN
5xDN
Vanne de régulation
50xDN
5xDN
Avec
tranquilisateur
de débit
2xDN
8xDN
5xDN

Figure 4.32 – Longueurs droites à respecter (d'après doc. Endress + Hauser)

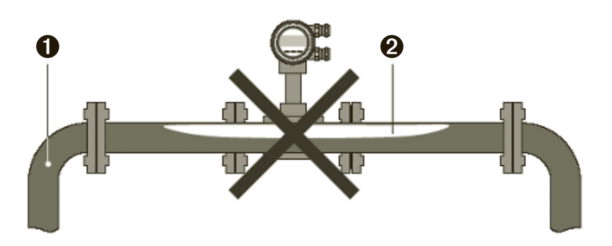


Figure 4.33 – Montage à éviter car risque de présence d'air (doc. KROHNE)

Ce montage est à éviter en raison de la présence du point haut formé par la conduite (1) qui engendre souvent la présence de poche de gaz (2).

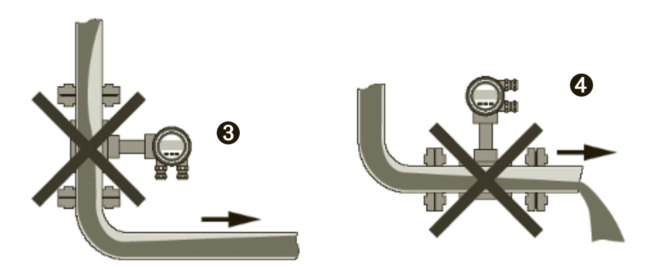


Figure 4.34 – Montage à éviter si risque de canalisation non complètement en charge (doc. KROHNE)

Ces montages sont à éviter en raison de la canalisation verticale (3) ou de la présence d'un coude directement en amont (4).

- **Principe de mesurage du débitmètre piézo-précessif**

Pour une mesure fiable, il faut entre 3D et 10 D en amont, et entre D et 5D en aval du débitmètre suivant les constructeurs. La précision est d'environ ± 2 % du débit mesuré.

- **Principe de mesurage du débitmètre à effet Coanda**

Pour une mesure fiable, il faut au minimum 15 D en amont, et 5D en aval du débitmètre suivant les constructeurs.
La précision à attendre de ce type de débitmètre est de l'ordre de 1,50 % de la pleine échelle. La perte de charge peut atteindre 50 000 Pa (0,5 bar) selon les modèles.

4.6 Le débitmètre volumique à turbine

4.6.1 Principe de fonctionnement

Le débitmètre volumique à turbine, aussi appelé à rotor hélicoïdal, est d'une application très courante dans le domaine du génie climatique en raison de sa compatibilité avec quasiment tous les liquides, et cela dans des plages de température et de pression très larges.

Son principe de fonctionnement repose la rotation d'une hélice (d'une roue de turbine ou d'un moulinet), placée dans l'axe de la canalisation, dont la vitesse de rotation angulaire est proportionnelle à la vitesse du fluide sous pression qui la traverse.

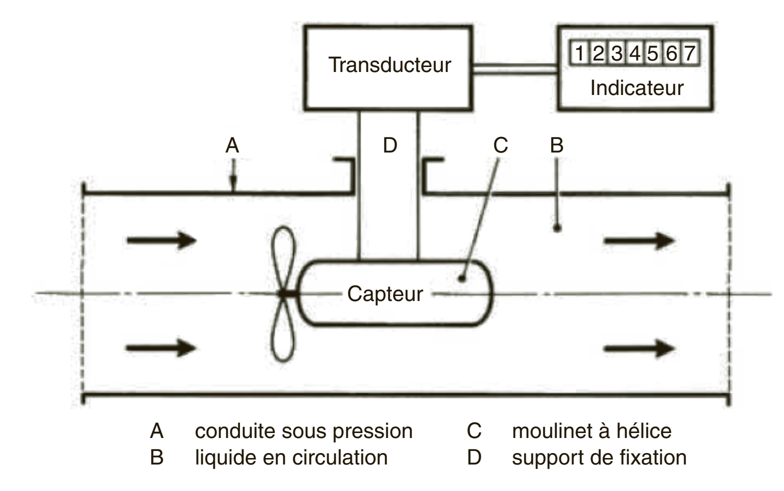


Figure 4.35 – Principe de fonctionnement (doc. T.I.)

Ce principe physique s'exprime par :

$$q = k \cdot \omega$$

avec :
q = débit volumique, en m^3/s.
k = constante caractéristique du compteur.
ω = vitesse de rotation de l'hélice à l'instant t.

Le volume V de liquide qui circule entre t_1 et t_2 est égal à :

$$V = k\int_{t_1}^{t_2} \omega . dt$$

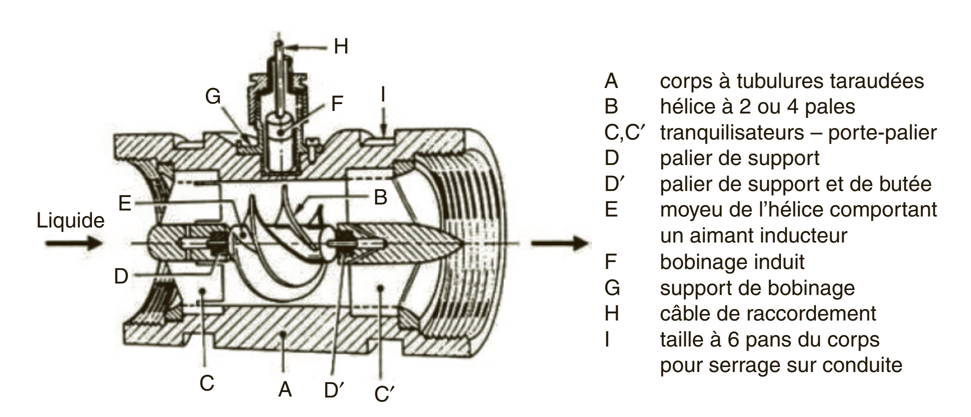


Figure 4.36 – Principe de fonctionnement (doc T.I. et Faure-Herman)

B

LES MESURES DE DÉBITS HYDRAULIQUES

4.6.2 Principe de mesurage

La mesure du débit réel est perturbée par la qualité intrinsèque du débitmètre :

– le rotor a une certaine masse, donc une inertie, qui engendre un certain retard pour indiquer la valeur « réelle » du débit lors de variation de régime ;
– la qualité de fabrication des ailettes, et notamment leur épaisseur, doit limiter les turbulences en toutes circonstances ;
– la viscosité du fluide exerçant une force sur le rotor sous forme d'un couple résistant, le débit peut être sous-estimé. Il convient d'installer le type de compteur qui correspond au fluide véhiculé ;
– la rotation du rotor sur ses paliers engendre inévitablement des frottements, donc une perte d'énergie, qui peuvent fausser la mesure. Un facteur correctif, entrant dans la valeur de la constante *k*, est généralement appliqué par le constructeur ;
– sous l'effet de la pression, la chambre de mesure peut subir une déformation et engendre ainsi, en plus d'une dégradation irréversible, une erreur de mesurage. Il convient de respecter les limites d'utilisation du constructeur.

Afin d'éviter des contraintes mécaniques sur les paliers du rotor, il est préférable d'installer ce type de compteur sur des canalisations horizontales.

La précision du débitmètre volumique à turbine peut se situer entre ± 0,5 % et ± 1 % de la valeur mesurée.

La plage de température de fonctionnement est de 20 °C à 150 °C, sous 500 bars maximum.

En cas d'utilisation ponctuelle d'un débitmètre en dehors de sa température d'étalonnage, il est possible d'appliquer au débit mesuré un coefficient correcteur qui se calcule de la façon suivante :

$$k' = 1 + 3.a.(T_m - T_e)$$

avec:

k' = coefficient correcteur.

a = coefficient de dilatation linéaire du matériau constituant la partie intérieure du mesureur (28.10^{-6} K^{-1} pour les alliages d'aluminium et 18.10^{-6} K^{-1} pour l'acier inoxydable).

T_m = température du fluide mesuré, en *K*.

T_e = température d'étalonnage (voir donnée constructeur), en *K*.

4.7 Les débitmètres volumétriques

4.7.1 Principes de fonctionnement

■ Principe de fonctionnement du débitmètre à piston rotatif

Il est issu de la technologie de la pompe ROOTS et construit sur le même principe, mais au lieu de fonctionner en tant qu'élément moteur pour le transport de fluide ou de matière plus ou moins pulvérulente, il est utilisé comme récepteur d'information sur le débit volumique circulant.

La qualité des pales, ou engrenages, en forme de huit et le montage des arbres sur roulements à billes, ou à aiguilles, permettent d'obtenir un faible couple résistant donc, une faible perte de charge mécanique. Il n'en demeure pas moins que la fuite de fluide entre les mobiles, ainsi qu'une périphérie du corps, doit être faible. Dans ces conditions, le compteur est pratiquement volumétrique.

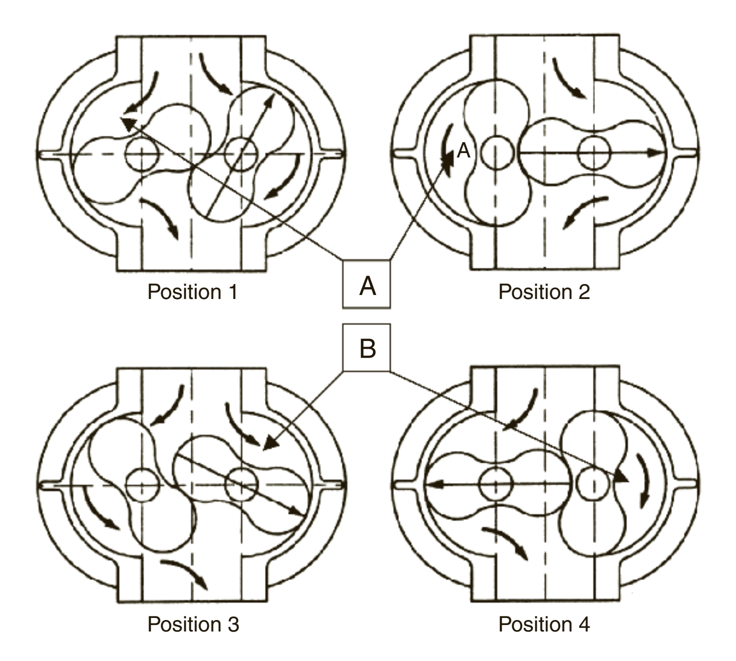


Figure.4.37 – Schéma de fonctionnement du débitmètre à piston rotatif (doc. T.I.)

C'est la vitesse du fluide sous pression qui fait tourner les pales (avec A = B) :

– en position 1, le fluide entre dans le volume A et sort du volume B ;
– en position 2, le volume A de fluide est contenu entre l'engrenage de gauche et la paroi intérieure du carter, et finit de sortir du volume B ;
– en position 3, le volume A s'évacue vers l'extérieur du débitmètre, pendant que le fluide entre dans le volume B ;
– en position 4, le volume B de fluide est contenu entre l'engrenage de droite et la paroi intérieure, pendant que le fluide entre dans le volume A, etc.

Pour chaque tour complet d'une pale sur 360°, il y a deux volumes de comptabilisés. Le volume cyclique du compteur est égal à 4 volumes.

■ Principe de fonctionnement du débitmètre à roues ovales

Le principe de fonctionnement est exactement le même que celui du piston rotatif sauf que les pales ont une forme elliptique et sont dentelées.

Un aimant permanent placé sur l'axe de chaque roue et un contact reed fixé sur le stator permettent de comptabiliser les impulsions à chaque tour de roue, et ainsi le volume qui a traversé le débitmètre.

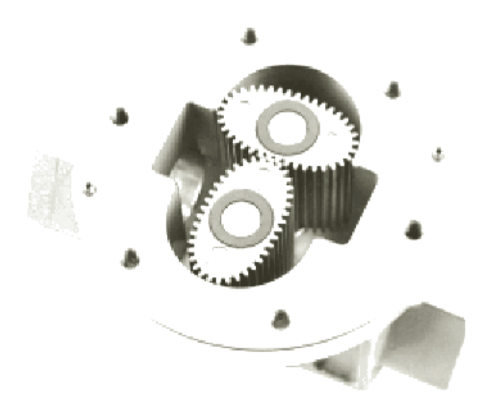


Figure 4.38 – Débitmètre à roues ovales (doc. Lutz)

■ Principe de fonctionnement du débitmètre à piston oscillant

Utilisés aussi bien pour mesurer des débits de liquides clairs que des produits pétroliers et des produits chimiques pour sa robustesse, le débitmètre à piston oscillant est d'un fonctionnement très simple :
Sous l'effet de la pression du fluide, le piston interne tourne autour de son axe dans la chambre de mesurage. Le fluide est admis et ressort de la chambre par des lumières périphériques. En tournant, un compartiment se vide pendant qu'un autre se rempli. Chaque cycle du piston laisse passer un volume connu de liquide. Un élément magnétique dans le piston active un relais et un capteur d'impulsions pour un mesurage du débit volumique.
Dans le schéma ci-dessous (en clair = présence liquide ; en grisé = vide) :

– position A : les compartiments 1 et 2 se remplissent pendant que 3 et 4 sont vides ;
– position B : le compartiment 4 ne paraît plus pendant que les compartiments 1 et 2 sont pleins ;
– position C : le compartiment 2 se vide et devient le compartiment 4 ;
– position D : le compartiment 3 disparaît tandis que 1 est plein.

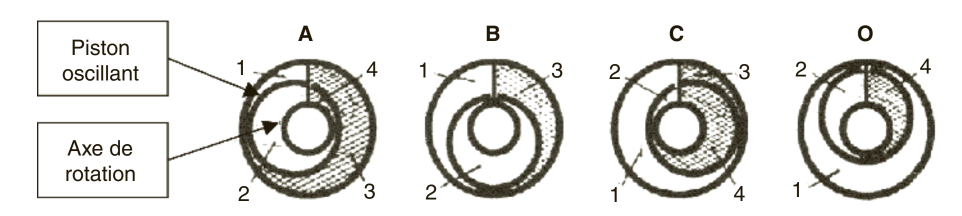


Figure 4.39 – Schéma de fonctionnement du débitmètre à piston oscillant (doc. J. Lefèbvre)

■ Principe de fonctionnement du débitmètre à vis

Sur le même principe de fonctionnement que les deux débitmètres précédents, ce débitmètre comporte deux éléments tournants dont le volume interstitiel est connu. Le fluide circulant fait tourner les deux vis hélicoïdales sans fin équipées de

capteurs dont la rotation est perçue par des détecteurs inductifs transformant le signal de fréquence.

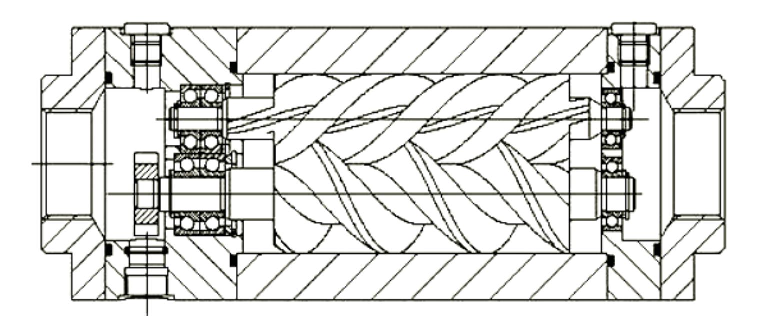


Figure 4.40 – Schéma d'un débitmètre à vis (doc. Krall/Kobold)

Principe de fonctionnement du débitmètre à palette

À ne pas confondre avec le flow-switch qui n'a qu'une fonction « tout-ou-rien » lorsqu'il est équipé d'un capteur I.L.S. (Interrupteur à Lamelle Sensible), le débitmètre à palette permet, grâce à la position de cette dernière perçue par un système aimant-capteur, de connaître le débit le traversant.
Fonctionnant sur le même principe que le débitmètre à disque, celui à palette est simplement équipé d'une aiguille (4) indicatrice de débit sur une échelle graduée (5). La force exercée par le fluide sur la palette (1) fait déplacer le bras de l'aiguille qui comprime un ressort qualibré (2). Le soufflet (3) en acier inox a pour fonction d'assurer l'étanchéité entre le corps et le compartiment de mesure qui comprend aussi le contacteur (6) et une lampe témoin (7).

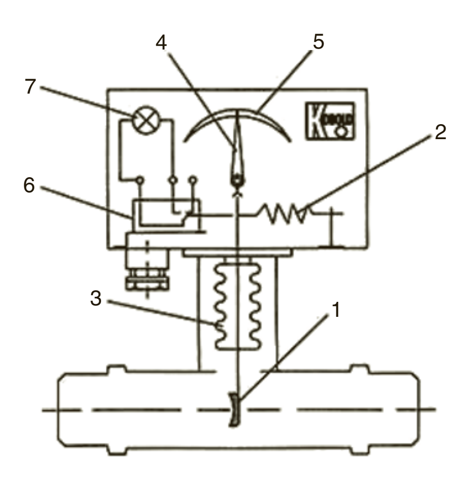


Figure 4.41 – Schéma d'un débitmètre à palette et soufflet (doc. Kobold)

Compte tenu de la masse de la palette, il est aussi recommandé de placer ce débitmètre de préférence sur une canalisation horizontale.
Il ne faut pas confondre cette appellation avec les débitmètres à « roues à palettes » qui permettent de déterminer le débit de fluide en fonction du volume de la chambre de mesurage et en comptabilisant le nombre de tours effectués.

4.7.2 Principes de mesurage

■ **Principe de mesurage avec un débitmètre à piston rotatif**

Ce type de débitmètre est insensible aux turbulences. Par conséquent, il n'est pas nécessaire de prévoir de longueur droite en amont, ni en aval.
La plage de température de fonctionnement se situe entre 20 et 150 °C, jusqu'à 500 bars. On peut attendre une précision comprise entre 0,5 % et 4 % de la valeur mesurée en fonction du constructeur.

■ **Principe de mesurage avec un débitmètre à roues ovales**

Ce type de débitmètre est insensible aux turbulences. Par conséquent, il n'est pas nécessaire de prévoir de longueur droite en amont, ni en aval.
On peut attendre une précision de 0,5 % et 2 % de la valeur mesurée.

■ **Principe de mesurage avec un débitmètre à piston oscillant**

Ce type de débitmètre est insensible aux turbulences. Par conséquent, il n'est pas nécessaire de prévoir de longueur droite en amont, ni en aval.
On peut attendre une précision située d'environ ± 1 % de la valeur mesurée.

■ **Principe de mesurage avec un débitmètre à vis**

Ce type de débitmètre est recommandé surtout pour les liquides visqueux, voire bitumeux.
Il insensible aux turbulences. Par conséquent, il n'est pas nécessaire de prévoir de longueur droite en amont, ni en aval.
On peut attendre une précision située entre ± 1 % de la valeur mesurée.

■ **Principe de mesurage avec un débitmètre à palette**

Ce type de débitmètre est assez sensible aux turbulences. Par conséquent, il est nécessaire de prévoir au moins trois longueurs droites en amont et une en aval afin d'obtenir un flux stable au niveau de la palette.
On peut attendre une précision située entre ± 1 % et ± 2 % de la valeur mesurée.

4.8 Le débitmètre hybride à section variable

4.8.1 Principe de fonctionnement

Un débitmètre à section variable, appelé aussi rotamètre, est composé d'un tube, généralement en verre, de forme tronconique dont la section s'accroît vers le haut et à l'intérieur duquel se trouve un flotteur. Le fluide arrive par la partie basse du cône et le traverse en exerçant une force sur le flotteur. Plus le débit est important et plus le flotteur s'élève libérant un espace annulaire de plus en plus grand.
Les modèles les plus récents sont équipés de sondes dont le signal de sortie est proportionnel au déplacement du flotteur.
Il est à noter que le terme « flotteur » est impropre car il peut être en acier inox, en céramique, en ébonite, etc, de manière à être compatible avec la nature corrosive éventuellement du fluide et permettre aussi d'utiliser une échelle de lecture aisée.

La position d'équilibre du flotteur est fonction de l'écoulement de bas en haut du fluide, du poids du flotteur et de la poussée d'Archimède correspondant à la poussée hydrostatique.
Dans le cas de débitmètre pour les hautes températures/hautes pression, le tube est métallique. Le flotteur n'étant plus visible, un système d'accouplement magnétique permet le report de sa position à l'extérieur du cylindre.
Chaque constructeur définit lui-même les réglettes de graduations propres aux caractéristiques dimensionnelles de ses flotteurs et du tube tronconique, en intégrant aussi la viscosité dynamique du fluide, et en fonction du débit nominal.

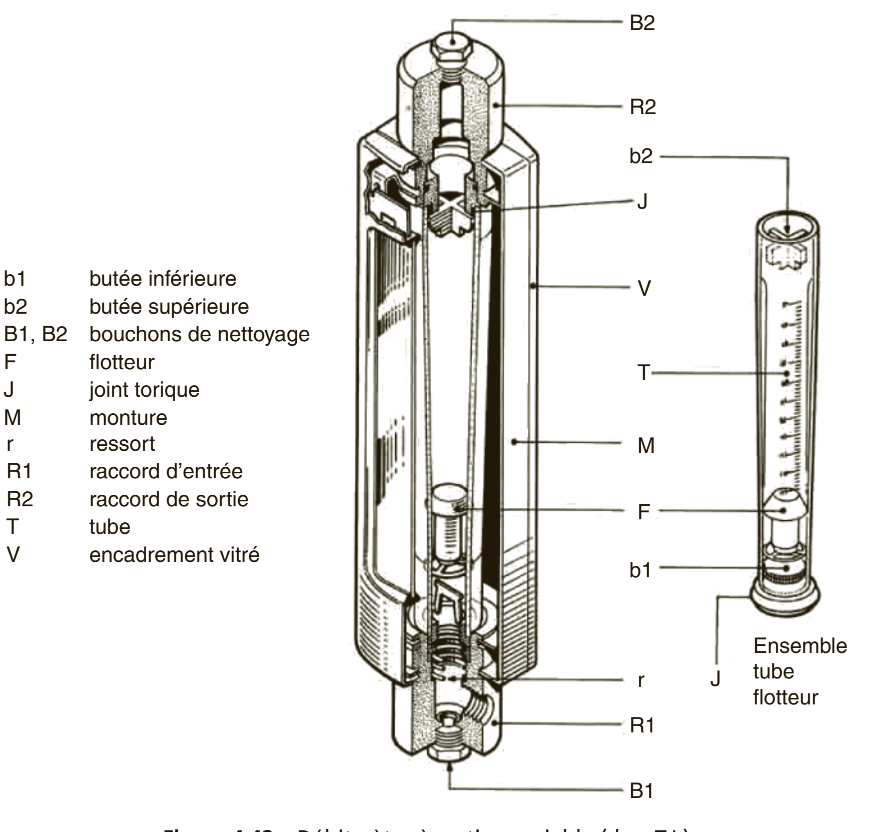


Figure 4.42 – Débitmètre à section variable (doc. T.I.)

4.8.2 Principe de mesurage

D'une installation très simple comme tout élément de tuyauterie, le débitmètre doit être toutefois posé strictement verticalement. À défaut, une erreur de mesure égale à $\sqrt{\cos\theta}$ serait à considérer.
Dans des conditions d'installation normale, le débit peut varier dans la proportion de 1 à 10 avec une précision de 0,5 % à 4 % de la valeur mesurée.
Ce type de débitmètre est insensible aux turbulences. Par conséquent, il n'est pas nécessaire de prévoir de longueur droite en amont, ni en aval.

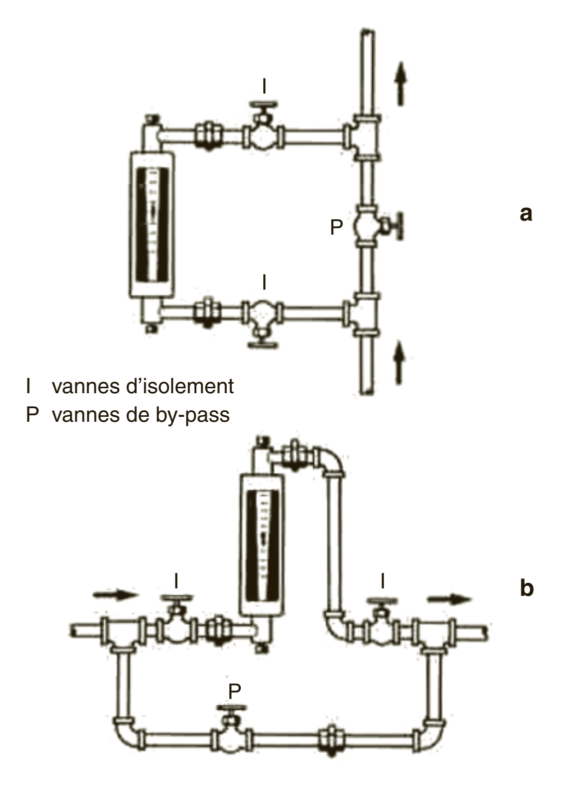


Figure 4.43 – Installation d'un débitmètre à section variable (doc. T.I.). « a » = installation sur canalisation verticale ; « b » = installation sur canalisation horizontale

La plage de température de fonctionnement se situe entre 20 et 100 °C (au-delà, les contraintes de dilatation du flotteur sont particulières) jusqu'à 30 bars pour les tubes en verre, et de 400 °C à 300 bars pour les tubes métalliques.

On peut attendre une précision comprise entre 0,5 % et 4 % de la valeur mesurée.

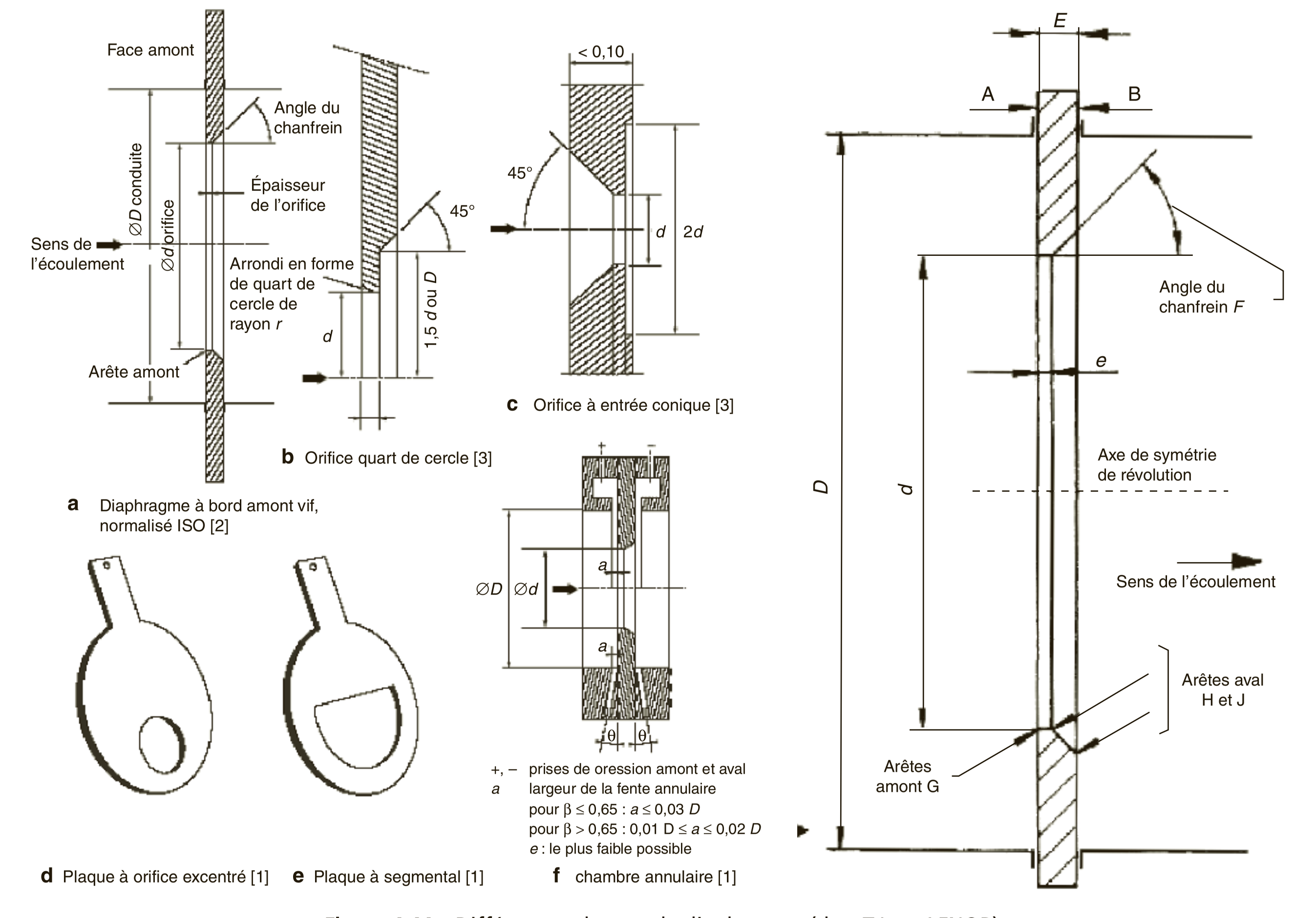
4.9 Les débitmètres déprimogènes

4.9.1 Principes de fonctionnement

On considère que les débitmètres déprimogènes sont parfois qualifiés d'hybrides car ils peuvent, suivant le modèle utilisé, déterminer un débit massique ou un débit volumique.

■ Principe de fonctionnement du débitmètre à diaphragme

Le diaphragme est un appareil déprimogène constitué d'une plaque mince percée d'un orifice circulaire, appelé disque, insérée entre deux brides dans la conduite où circule un fluide en charge et en régime subsonique. La mesure de l'écart de pression statique mesurée de part et d'autre du diaphragme, correspondant à la pression différentielle, permet de connaître sa perte de charge et ainsi de déterminer le débit qui le traverse en fonction de ses caractéristiques de construction normalisées. La conduite doit être complètement remplie dans la section de mesure.



a Diaphragme à bord amont vif, normalisé ISO [2]

b Orifice quart de cercle [3]

c Orifice à entrée conique [3]

d Plaque à orifice excentré [1]

e Plaque à segmental [1]

f chambre annulaire [1]

Figure 4.44 – Différentes plaques de diaphragme (doc. T.I. et AFNOR)

C'est un appareil de mesurage exclusivement en poste fixe. De part sa fonctionnalité, il n'est pas utilisable en appareil portatif. Les diaphragmes sont prévus dès la construction de l'installation et incérés dans les conduites. Les opérations de mesurage seront réalisées depuis les prises de pression amont et aval extérieures.

Le diaphragme est utilisable indifféremment en présence fluide compressible ou incompressible.

Les principales spécifications concernant la plaque sont :

– face amont plane, de rugosité *k* (hauteur totale) inférieure à 0,0003 d à l'intérieur d'un cercle de diamètre 1,5 d concentrique à l'orifice.
– face aval plane parallèle à la face amont.

$$e \leq E \leq 0{,}05\ d \text{ et } 0{,}005\ D \leq e \leq 0{,}02\ D.$$

– $F = 45° \pm 15°$.
– si $E \leq 0{,}02\ D$, le chanfrein n'est pas obligatoire.
– arête amont *G* vive.
– détermination de d comme moyenne des mesures d'au moins 4 diamètres répartis angulairement (aucune des 4 mesures ne différant de la moyenne de plus de $5 \cdot 10^{-4}\ d$).

Les principales conditions d'emploi concernant la plaque sont :

– $d \geq 0{,}0125$ m.
– $0{,}05 \text{ m} \leq D \leq 1$ m.
– $0{,}20 \leq \dfrac{d}{D} \leq 0{,}75$ maximum. Le rapport $\dfrac{d}{D}$ se symbolise par β.
– $\dfrac{k}{D} \leq 10^{-3}$.
– $\dfrac{\Delta p}{p_1} \leq 0{,}25$.



Figure 4.45 – Exemple de plaques de diaphragme (doc. Schlumberger)

Cette méthode de mesurage consiste donc à interposer un élément perturbateur de caractéristiques connues, le diaphragme, sur le passage du fluide s'écoulant dans la conduite, et qui crée ainsi une pression différentielle du fluide entre l'amont et le col d'une part, et entre le col et l'aval d'autre part.

Il est à noter que les plaques de diaphragme sont normalisées, alors que les diaphragmes à orifice excentré, à orifice segmental (type quart de cercle), à orifice annulaire (appelé aussi orifice à cible)…ne sont pas normalisés en France.

Le profil des vitesses au passage du col est très caractéristique comme l'indique la figure 4.46 :

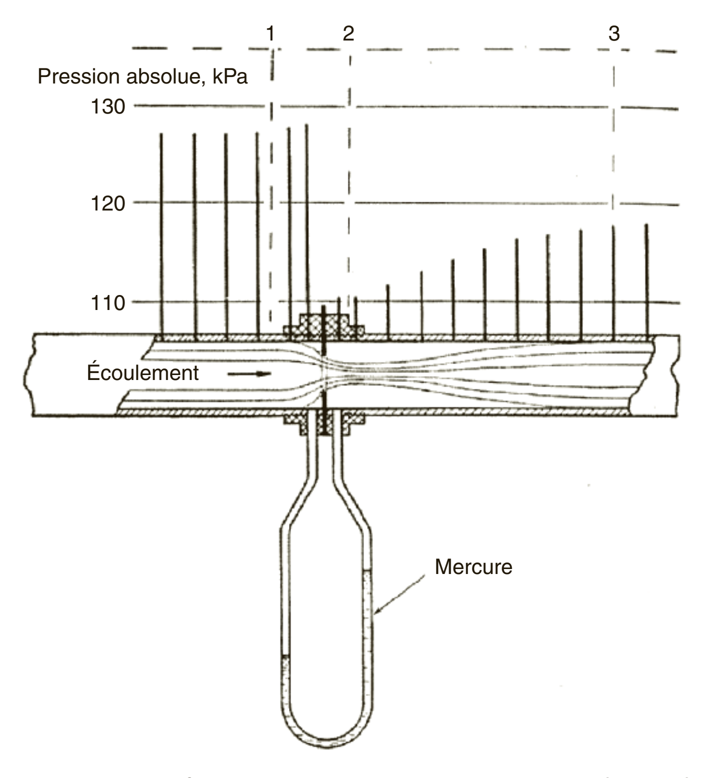


Figure 4.46 – Profil des vitesses dans le col du diaphragme (doc. T.I.)

La figure 4.46 schématise l'écoulement d'un fluide dans une conduite fermée cylindrique et de section constante, au passage d'un diaphragme sans épaisseur percé d'un orifice de section circulaire et centré.

À débit constant, dans une conduite complètement remplie, chacune des sections droites 1, 2 et 3 est traversée en des temps égaux par des masses égales de matière ; la vitesse d'écoulement est donc, par exemple, plus élevée en 2 qu'en 1, de sorte que l'énergie cinétique du fluide s'accroît localement à la traversée de l'étranglement.

L'évolution de la pression est également schématisée par le bargraphe figuré au-dessus de la conduite. Il est à noter que ce n'est pas au droit de la constriction que la veine fluide active est la plus étroite mais un peu en aval, dans le plan dit « *Vena Contracta* » qui correspond à la section 2.

La chute de pression statique à la traversée de la constriction entraîne une diminution temporaire de la densité du fluide, très généralement négligeable pour les liquides, mais non pour les gaz, ce qui accroît encore leur vitesse et leur énergie cinétique. Par ailleurs, le fluide, en aval de l'étranglement, retrouve nécessairement la vitesse qu'il avait en amont puisque le bilan matière est nul. En ce qui concerne le bilan énergétique, une partie de l'énergie interne du fluide amont est perdue par frottement à la traversée de la constriction, et c'est l'énergie de pression qui en assure la compensation : la pression amont en 1 n'est pas entièrement restaurée en 3.
C'est la différence de pression entre l'amont (section droite 1) et l'aval immédiat de la constriction (au voisinage de la section droite 2) qui est exploitée pour mesurer le débit dans la conduite.
Dans le cas d'un liquide, il est indispensable de connaître la masse volumique du fluide et sa viscosité (soit dynamique μ, soit cinématique υ). La masse volumique à considérer sera celle à la prise de pression amont tandis que la température sera de préférence celle en aval de la plaque du diaphragme.
On peut en déduire la valeur du débit-masse car celui-ci est directement lié à la pression différentielle mesurée. L'équation qui lie ces deux grandeurs est la suivante :

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}}\varepsilon\frac{\pi}{4}d^2\sqrt{2\Delta p \rho_1} \qquad (1)$$

avec :
q_m = débit-masse traversant le col (kg/s).
C = coefficient de décharge normalisé[1].
β = rapport des diamètres de l'orifice $\frac{d}{D}$ (sans dimension).
d = diamètre du col (ou de l'orifice) dans les conditions de service (m).
D = diamètre interne de la conduite dans les conditions de service en amont de l'élément déprimogène (m).
ε = coefficient de détente normalisé[2].
Δp = pression différentielle (Pa).
ρ_1 = masse volumique du fluide en amont (kg/m^3).
Le rapport $\frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}}$ se symbolise parfois par la lettre α et s'appelle alors le « coefficient de débit ».
La valeur de β est limitée à 0,75.

Nota
Un exemple de calcul d'incertitude qui entache l'énergie thermique mesurée à partir d'un débitmètre à diaphragme est détaillé en annexe du chapitre « Rappels de métrologie ».

On peut calculer le débit-volume q_v à l'aide de l'équation :

$$q_v = \frac{q_m}{\rho}$$

1. Les équations détaillées nécessaires au calcul du coefficient de décharge C et les tableaux correspondants sont indiqués en annexe.
2. Les valeurs du coefficient de détente ε pour les diaphragmes sont indiquées ci-après.

Le coefficient de décharge C relie le débit réel traversant l'appareil au débit théorique et qui est donné par la formule suivante pour les fluides incompressibles :

$$C = \frac{q_m\sqrt{1-\beta^4}}{\frac{\pi}{4}d^2\sqrt{2\Delta p\rho_1}}$$

Se reporter au chapitre 3.1 « Rappel de mécanique des fluides appliquée aux sondes de pression » pour ce qui concerne certaines similitudes des fluides incompressibles et de l'air en considérant les hypothèses liées au domaine du génie climatique.

C est fonction à la fois de la valeur du nombre de Reynolds et des valeurs du rapport des pressions et de l'exposant isentropique κ du gaz (pour mémoire, le rapport de la capacité thermique à pression constante à la capacité thermique massique à volume constant, dénommé γ, est égal à l'exposant isentropique κ dans le cas des gaz parfaits).

On se rend compte que l'équation X permettant de calculer q_m fait appel à la valeur de C qui lui-même dépend du débit q_m. Les valeurs de q_m et de C sont dites « corrélées ».

À la construction d'une installation, on est alors obligé de procéder à des calculs itératifs pour déterminer le diamètre du diaphragme. On doit donc choisir d'abord :

– le type de diaphragme à utiliser ;
– une valeur du débit q_m et la valeur correspondante de la pression différentielle Δp.

L'équation (1) s'écrit alors sous la forme suivante :

$$\frac{C\varepsilon\beta^2}{\sqrt{1-\beta^4}} = \frac{4q_m}{\pi D^2\sqrt{2\Delta p\rho_1}}$$

Les valeurs de C en tant que fonction de β, de Re_D et de D sont données à titre indicatif dans les tableaux en annexe. Ces valeurs ne sont pas prévues pour une interpolation précise. L'extrapolation n'est pas permise.

Pour mémoire, rappelons que le nombre de Reynolds Re, qui exprime le rapport de la force d'inertie sur la force de viscosité, rapporté à un diamètre D, se calcule de la manière suivante :

$$Re_D = \frac{\rho . V.D}{\mu} = \frac{V.D}{\upsilon}$$

avec :

ρ = la masse volumique du fluide en kg/m^3.

μ = la viscosité dynamique du fluide en kg.m^{-1}.s^{-1}, et $\mu = \frac{\upsilon}{\rho}$.

υ = la viscosité cinématique du fluide en m^2/s.

V = la vitesse du fluide en m/s.

D = le diamètre de la canalisation en m.

Si $Re < 2\,320$, on dit que l'écoulement est en régime « laminaire ».

Si $Re >> 2\,320$, on dit que l'écoulement est régime « turbulent ».

B

LES MESURES DE DÉBITS HYDRAULIQUES



Entre *Re* = 2 320 et *Re* = 5 000, le régime est dénommé « transitoire ».

Figure 4.47 – Viscosité cinématique υ de quelques fluides en fonction de leur température (Doc. MM. Porcher & Brun)

Le coefficient de détente ε est utilisé pour tenir compte de la compressibilité du fluide :

$$\varepsilon = 1 - (0{,}351 + 0{,}256\beta^4 + 0{,}93\beta^8)\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{\kappa}}\right]$$

avec :

κ = exposant isentropique du fluide (sans dimension). C'est le rapport de la variation relative de la pression à la variation relative de la masse volumique qui lui correspond dans une transformation adiabatique. Cet exposant varie donc en fonction de la nature du gaz, de sa température et de sa pression.

Pour rappel, le rapport de la capacité thermique à pression constante à la capacité thermique massique à volume constant, dénommé γ, est égal à l'exposant isentropique κ dans le cas des gaz parfaits.

Quelques valeurs de κ :

- pour les gaz monoatomiques : κ = 1,67 = 5/3 (exemple de l'Argon Ar, de l'Hélium He…) ;
- pour les gaz diatomiques : κ = 1,4 = 7/5 (exemple de l'air principalement constitué d'azote N_2 et d'oxygène O_2, de l'hydrogène H_2…) ;
- pour les gaz triatomiques : κ = 1,33 = 8/6 (exemple de l'ozone O_3).

Cette équation n'est applicable que si $\tau \geq 0{,}75$.

Se reporter au tableau 4.1 à titre indicatif pour les certaines valeurs de ε.

Tableau 4.1 – Diaphragme – coefficient de détente ε (doc. AFNOR)

Rapport des diamètres		Coefficient de détente, ε, pour p^2/p^1 égal à							
β	β^4	0,98	0,96	0,94	0,92	0,90	0,85	0,80	0,75
pour κ = 1,2									
0,100 0	0,000 1	0,994 1	0,988 3	0,982 4	0,976 4	0,970 5	0,955 5	0,940 4	0,925 2
0,562 3	0,100 0	0,993 6	0,987 1	0,980 6	0,974 1	0,967 6	0,951 1	0,934 5	0,917 7
0,668 7	0,200 0	0,992 7	0,985 3	0,977 9	0,970 5	0,963 1	0,544 3	0,925 4	0,906 3
0,740 1	0,300 0	0,991 5	0,982 9	0,974 3	0,965 7	0,957 0	0,935 2	0,913 2	0,891 0
0,750 0	0,316 4	0,991 2	0,982 4	0,973 6	0,984 8	0,955 9	0,933 5	0,910 9	0,888 1
pour κ = 1,3									
0,100 0	0,000 1	0,994 6	0,989 1	0,983 7	0,978 2	0,972 7	0,958 7	0,944 6	0,930 3
0,562 3	0,100 0	0,994 0	0,988 1	0,982 1	0,976 0	0,970 0	0,954 7	0,939 1	0,923 4
0,668 7	0,200 0	0,993 2	0,986 4	0,979 6	0,972 7	0,965 8	0,948 4	0,930 7	0,912 8
0,740 1	0,300 0	0,992 1	0,984 2	0,976 2	0,968 2	0,960 2	0,939 9	0,919 3	0,898 5
0,750 0	0,316 4	0,991 9	0,983 8	0,975 6	0,967 4	0,959 1	0,938 3	0,917 2	0,895 8
pour κ = 1,4									
0,100 0	0,000 1	0,995 0	0,989 9	0,984 8	0,979 7	0,974 6	0,961 5	0,948 3	0,934 8
0,562 3	0,100 0	0,994 5	0,988 9	0,983 3	0,977 7	0,972 0	0,957 7	0,943 1	0,928 3
0,668 7	0,200 0	0,993 7	0,987 4	0,981 0	0,974 8	0,968 1	0,951 8	0,935 3	0,918 4
0,740 1	0,300 0	0,992 7	0,985 3	0,977 9	0,970 4	0,962 9	0,943 9	0,924 6	0,905 0
0,750 0	0,316 4	0,992 5	0,984 9	0,977 3	0,969 6	0,961 9	0,942 4	0,922 6	0,902 5
pour κ = 1,66									
0,100 0	0,000 1	0,995 8	0,991 5	0,987 2	0,982 8	0,978 4	0,967 3	0,955 8	0,944 1
0,562 3	0,100 0	0,995 3	0,990 6	0,985 9	0,981 1	0,976 3	0,964 0	0,951 5	0,938 6
0,668 7	0,200 0	0,994 7	0,989 3	0,983 9	0,978 5	0,973 0	0,959 0	0,944 7	0,930 1
0,740 1	0,300 0	0,993 8	0,987 6	0,981 3	0,974 9	0,968 5	0,952 3	0,935 7	0,918 6
0,750 0	0,316 4	0,993 6	0,987 2	0,980 8	0,974 3	0,967 7	0,951 0	0,934 0	0,916 4
Note : ce tableau est donné à titre indicatif. Il n'est pas prévu pour une interpolation précise. L'extrapolation n'est pas permise.									

Expression de ε en fonction de q_m et de C :

B

LES MESURES DE DÉBITS HYDRAULIQUES

$$\varepsilon = \frac{q_m\sqrt{1-\beta^4}}{\frac{\pi}{4}d^2C\sqrt{2\Delta p\rho_1}}$$

La méthode adoptée pour représenter les variations à la fois du nombre de Reynolds et des valeurs du rapport des pressions et de l'exposant isentropique, consiste à multiplier le coefficient de décharge C de l'élément primaire considéré par le coefficient de détente ε exécutés pour la même valeur du nombre de Reynolds. Le coefficient de détente ε est égal à 1 lorsque le fluide est considéré comme incompressible (liquide), et est inférieur à 1 lorsque le fluide est compressible (gazeux).

■ Principe de fonctionnement du débitmètre à tuyère

La tuyère est un diaphragme profilé de manière à mouler au mieux la veine fluide dans sa contraction. La section la plus étroite, appelée col, est prolongée par une partie cylindrique au-delà de laquelle les filets fluides ne sont plus guidés. On mesure la différence de pression entre l'amont et l'aval.

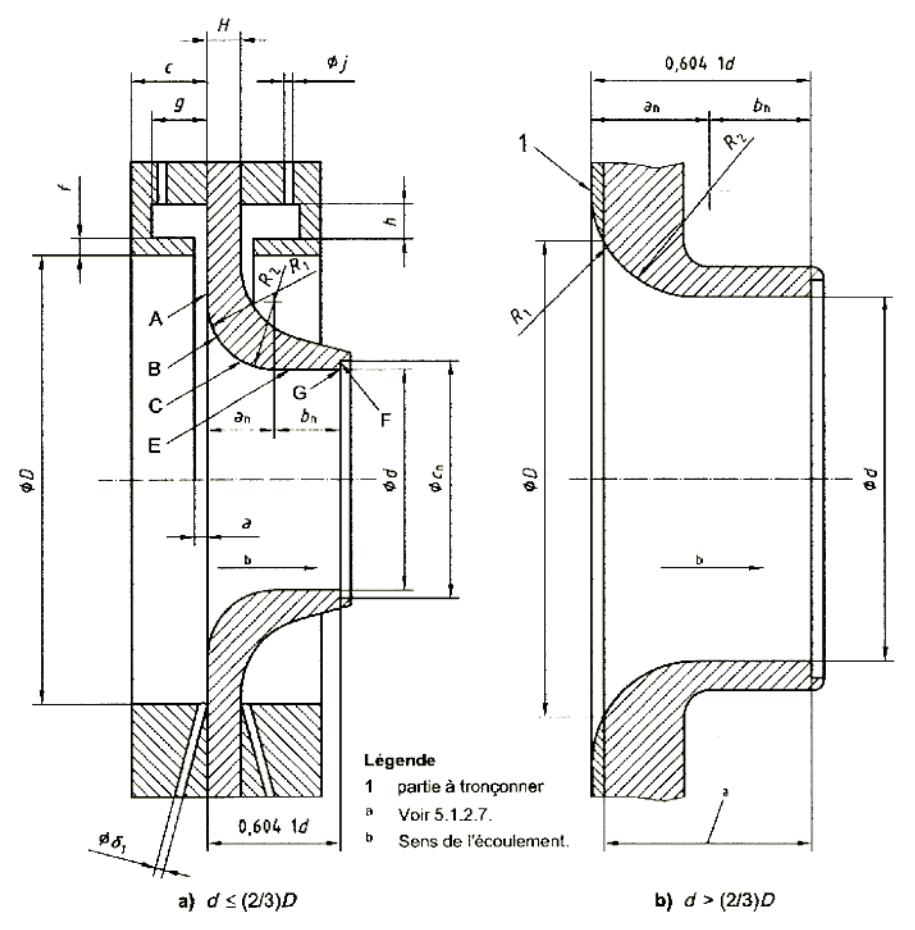
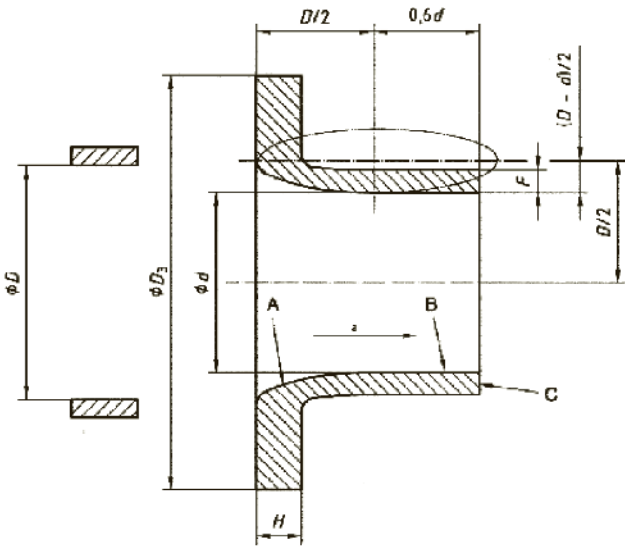
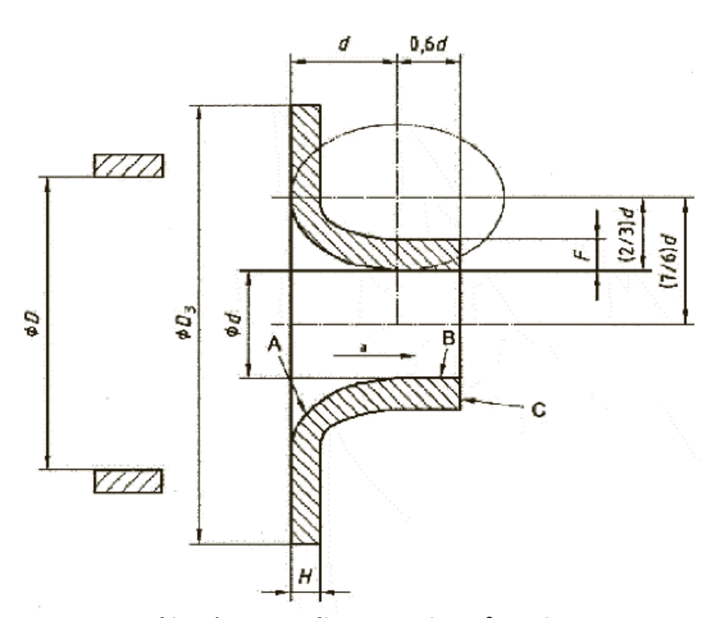


Figure 4.48 – Tuyères type ISA 1932 (doc. AFNOR)



a) Grand rapport d'ouverture (0,25 ≤ β ≤ 0,8)

Figure 4.49 – Tuyères (doc. AFNOR)



b) Petit rapport d'ouverture (0,2 ≤ β ≤ 0,5)

Comme pour le diaphragme, on peut en déduire la valeur du débit-masse car celui-ci est directement lié à la pression différentielle mesurée. L'équation qui lie ces deux grandeurs est la suivante :

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}}\varepsilon\frac{\pi}{4}d^2\sqrt{2\Delta p\rho_1} \qquad (1)$$

avec :
q_m = débit-masse traversant le col (kg/s).
C = coefficient de décharge normalisé.

β = rapport des diamètres de l'orifice $\frac{d}{D}$ (sans dimension).

d = diamètre du col (ou de l'orifice) dans les conditions de service (m).
D = diamètre interne de la conduite dans les conditions de service en amont de l'élément déprimogène (m).
ε = coefficient de détente normalisé.
Δp = pression différentielle (Pa).
ρ_1 = masse volumique du fluide en amont (kg/m^3).

Le rapport $\frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}}$ se symbolise parfois par la lettre α et s'appelle alors le « coefficient de débit ».

$0{,}30 \leq \beta \leq 0{,}80$ et 50 mm $\leq D \leq$ 500 mm pour les *tuyères type ISA 1932*, et lorsque Re_D se trouve dans les limites suivantes :

– pour $0{,}30 \leq \beta < 0{,}44$; $7.10^4 \leq Re_D \leq 10^7$;
– pour $0{,}44 \leq \beta < 0{,}80$; $2.10^4 \leq Re_D \leq 10^7$.

– $0{,}20 \leq \beta \leq 0{,}80$ et 50 mm $\leq D \leq$ 630 mm pour les *tuyères à long rayon*, et lorsque $10^4 \leq Re_D \leq 10^7$

Le coefficient de décharge C pour les tuyères type ISA 1932 se calcule avec l'équation :

$$C = 0{,}990\,0 - 0{,}226\,2\beta^{4,1} - (0{,}001\,75\beta^2 - 0{,}003\,3\beta^{4,15})\left(\frac{10^6}{Re_D}\right)^{1,15}$$

Le coefficient de décharge C des tuyères à long rayon se calcule avec l'équation :

$$C = 0{,}996\,5 - 0{,}006\,53\sqrt{\frac{10^6\beta}{Re_D}}$$

Des tableaux de valeurs de C en fonction de β et de Re_D sont donnés en annexe pour ces deux types de tuyères.

Les valeurs du coefficient de détente ε pour les tuyères se calculent en général selon l'équation :

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\kappa\tau^{2/\kappa}}{\kappa-1}\right)\left(\frac{1-\beta^4}{1-\beta^4\tau^{2/\kappa}}\right)\left(\frac{1-\tau^{(\kappa-1)/\kappa}}{1-\tau}\right)}$$

avec :
κ = exposant isentropique (rapport de la capacité thermique massique à pression constante à la capacité thermique massique à volume constant.
τ = rapport des pressions p_2/p_1.
β = rapport des diamètres d/D.

Tableau 4.2 – Tuyère – coefficient de détente ε (doc. AFNOR)

Rapport des diamètres		**Coefficient de détente, ε, pour p^2/p^1 égal à**								
β	**$β^4$**	**1,00**	**0,98**	**0,96**	**0,94**	**0,92**	**0,90**	**0,85**	**0,80**	**0,75**
				pour κ = 1,2						
0,200 0	0,001 6	1,000 0	0,987 4	0,974 7	0,961 9	0,949 0	0,935 9	0,902 8	0,868 7	0,833 8
0,562 3	0,100 0	1,000 0	0,985 6	0,971 2	0,956 8	0,942 3	0,927 8	0,891 3	0,854 3	0,816 9
0,668 7	0,200 0	1,000 0	0,983 4	0,966 9	0,950 4	0,934 1	0,917 8	0,877 3	0,837 1	0,797 0
0,740 1	0,300 0	1,000 0	0,980 5	0,961 3	0,942 4	0,923 8	0,905 3	0,860 2	0,816 3	0,773 3
0,795 3	0,400 0	1,000 0	0,976 7	0,954 1	0,932 0	0,910 5	0,889 5	0,839 0	0,790 9	0,744 8
0,800 0	0,409 6	1,000 0	0,976 3	0,953 3	0,930 9	0,909 1	0,887 8	0,836 7	0,788 2	0,741 8
				pour κ = 1,3						
0,200 0	0,001 6	1,000 0	0,988 4	0,976 6	0,964 8	0,952 8	0,940 7	0,909 9	0,878 1	0,845 4
0,562 3	0,100 0	1,000 0	0,986 7	0,973 4	0,960 0	0,946 6	0,933 1	0,899 0	0,864 5	0,829 4
0,668 7	0,200 0	1,000 0	0,984 6	0,969 3	0,954 1	0,938 9	0,923 7	0,885 9	0,848 1	0,810 2
0,740 1	0,300 0	1,000 0	0,982 0	0,964 2	0,946 6	0,929 2	0,912 0	0,869 7	0,828 3	0,787 5
0,795 3	0,400 0	1,000 0	0,978 5	0,957 5	0,936 9	0,916 8	0,897 1	0,849 5	0,803 9	0,759 9
0,800 0	0,409 6	1,000 0	0,978 1	0,956 7	0,9335 8	0,915 4	0,895 5	0,847 3	0,801 3	0,757 0
				pour κ = 1,4						
0,200 0	0,001 6	1,000 0	0,989 2	0,978 3	0,967 3	0,956 1	0,944 8	0,916 0	0,886 3	0,855 6
0,562 3	0,100 0	1,000 0	0,987 7	0,975 3	0,962 8	0,950 3	0,937 7	0,905 8	0,873 3	0,840 2
0,668 7	0,200 0	1,000 0	0,985 7	0,971 5	0,957 3	0,943 0	0,928 8	0,893 3	0,857 7	0,821 9
0,740 1	0,300 0	1,000 0	0,983 2	0,966 7	0,950 3	0,934 0	0,917 8	0,878 0	0,838 8	0,800 0
0,795 3	0,400 0	1,000 0	0,980 0	0,960 4	0,941 1	0,922 3	0,903 8	0,858 8	0,815 4	0,773 3
0,800 0	0,409 6	1,000 0	0,979 6	0,959 7	0,940 1	0,921 0	0,902 2	0,856 7	0,812 9	0,770 5
				pour κ = 1,66						
0,200 0	0,001 6	1,000 0	0,990 9	0,981 7	0,972 3	0,962 8	0,953 2	0,928 6	0,903 1	0,876 6
0,562 3	0,100 0	1,000 0	0,989 6	0,979 1	0,968 5	0,957 8	0,947 1	0,919 7	0,891 7	0,862 9
0,668 7	0,200 0	1,000 0	0,987 9	0,975 9	0,963 7	0,951 6	0,939 4	0,908 8	0,877 8	0,846 4
0,740 1	0,300 0	1,000 0	0,985 8	0,971 8	0,957 7	0,943 8	0,929 9	0,895 3	0,860 9	0,826 5
0,795 3	0,400 0	1,000 0	0,983 1	0,966 4	0,949 9	0,933 6	0,917 6	0,878 2	0,839 7	0,802 0
0,800 0	0,409 6	1,000 0	0,982 7	0,965 8	0,949 0	0,932 5	0,916 2	0,876 3	0,837 4	0,799 4

Note : ce tableau est donné à titre indicatif. Il n'est pas prévu pour une interpolation précise. L'extrapolation n'est pas permise.

■ Principe de fonctionnement du débitmètre à tube de Venturi

Comme le diaphragme, le tube de Venturi (quelquefois aussi appelé tube de Herschel) est un appareil déprimogène. Il est constitué d'un convergent d'entrée, relié à un col cylindrique qui se poursuit en un divergent. Le fluide est en charge et en régime subsonique dans la conduite. La mesure de l'écart de pression statique mesurée entre le côté amont et le col, correspondant à la pression différentielle, permet de connaître sa perte de charge et ainsi de déterminer le débit qui le traverse en fonction de ses caractéristiques de construction normalisées.

Le fluide peut être soit compressible, soit considéré comme incompressible.

Les principales spécifications concernant le tube lui-même sont :

- la longueur minimale du cylindre *A* est au moins égal à *D* ;
- le convergent tronconique *B* doit avoir un angle au sommet de 21° ± 1° ;
- la longueur du convergent *B* doit être approximativement égale à 2,7 (*D-d*) ;
- le col cylindrique *C* doit être de diamètre *d* et de longueur *d* ± 0,03*d*.

Légende

1 convergent tronconique E
2 col cylindrique C
3 convergent tronconique B
4 col cylindrique ⊕ A
5 plans de raccordement
a 7° ≤ φ ≤ 15°
b Sens de l'écoulement
c Voir 5.4.7

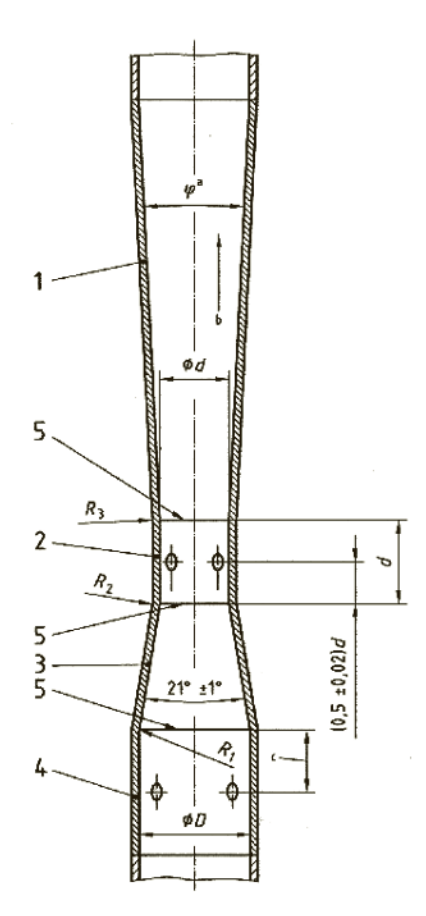


Figure 4.50 – Tube de Venturi (doc. AFNOR)

– La longueur totale du tube de Venturi dépend de son mode de fabrication :
  • avec convergent usiné : longueur de 50mm à 250 mm ;
  • avec convergent en tôle brute soudée : longueur de 200 mm à 1 200 mm ;
  • avec convergent brute de fonderie : 100 mm à 800 mm.

Pour ce qui concerne les prises de pression, des dispositions particulières sont à respecter :

– si $d \leq 33{,}3$ mm, le diamètre des prises doit être compris entre 4 mm et 10 mm sans toutefois excéder 0,1 D pour les prises amont et 0,13 D pour les prises au col ;
– si < 33,3 mm, le diamètre des prises de pression amont doit être compris entre 0,1 d et 0,1 D, et le diamètre des prises au col doit être compris entre 0,1 d et 0,13 d ;
– le diamètre des prises de pression doit aussi être compatible avec la viscosité et la propreté du fluide ;
– il doit y avoir au moins quatre prises de pression en amont et au col ;
– la longueur des prises de pression doit être d'au moins 2,5 fois leur diamètre intérieur ;

– l'éloignement des prises de pression amont (cf. la distance c parallèle à l'axe du tube sur la figure 4.50) varie suivant la fabrication du tube de Venturi :
  • avec convergent usiné ou en tôle brute soudée : c = 0,5 D ± 0,05 D
  • avec convergent brut de fonderie : c = 0,5 D ± 0,25 D

Les principales conditions d'emploi concernant la plaque sont :

– pour les convergents usinés :
  • 50 mm ≤ D ≤ 250 mm
  • 0,4 ≤ β ≤ 0,75
  • $2.10^5 \leq Re_D \leq 1.10^6$
– pour les convergents en tôle brute soudée :
  • 200 mm ≤ D ≤ 1 200 mm
  • 0,4 ≤ β ≤ 0,7
  • $2.10^5 \leq Re_D \leq 2.10^6$
– pour les convergents brut de fonderie :
  • 100 mm ≤ D ≤ 800 mm
  • 0,3 ≤ β ≤ 0,75
  • $2.10^5 \leq Re_D \leq 2.10^6$

À ce jour, la limite de pression d'utilisation est de 1 Mpa (≈10 bars).
Le principe de fonctionnement du Venturi est le même que pour le diaphragme. C'est la différence de pression entre le cylindre en amont du convergent et le cylindre en aval qui est exploitée pour mesurer le débit dans la conduite.

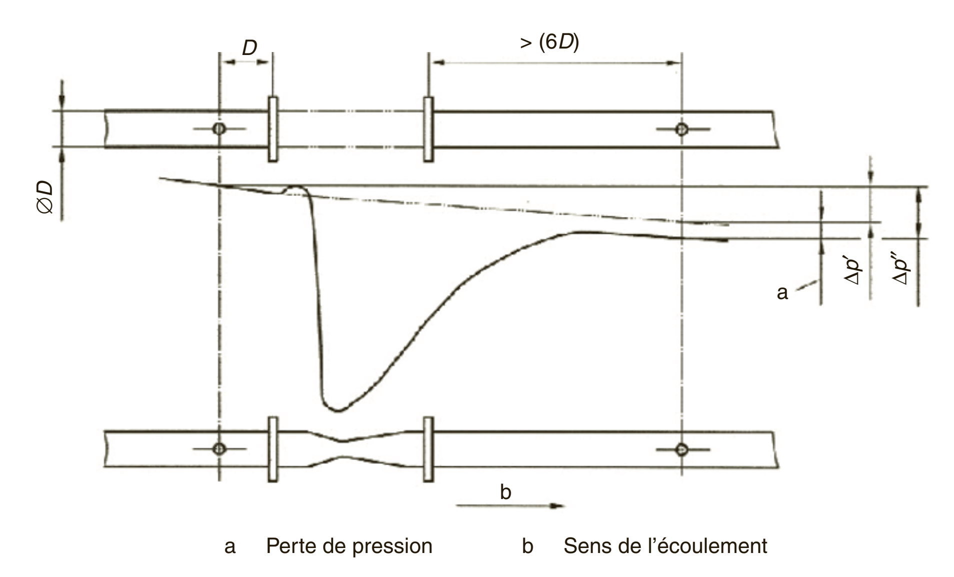


Figure 4.51 – Profil des vitesses dans le tube de Venturi (doc. AFNOR)

À titre indicatif, la perte de pression relative $\xi = \dfrac{\Delta p'' - \Delta p'}{\Delta p}$ reste généralement comprise entre 5 % et 20 %.

On peut en déduire la valeur du débit-masse car celui-ci est directement lié à la pression différentielle mesurée. L'équation qui lie ces deux grandeurs est la suivante :

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}}\varepsilon\frac{\pi}{4}d^2\sqrt{2\Delta p \rho_1}$$

avec :
q_m = débit-masse traversant le col (kg/s).
C = coefficient de décharge.

β = rapport des diamètres de l'orifice $\frac{d}{D}$ (sans dimension).

d = diamètre du col (ou de l'orifice) dans les conditions de service (m).
D = diamètre interne de la conduite dans les conditions de service en amont de l'élément déprimogène (m).
ε = coefficient de détente.
Δp = pression différentielle (Pa).
ρ_1 = masse volumique du fluide en amont (kg/m^3).

Les valeurs du coefficient de décharge C sont les suivantes :

– pour un tube de Venturi à convergent usiné : C = 0,995 ;
– pour un tube de Venturi à convergent en tôle brute soudée : C = 0,985 ;
– pour un tube de Venturi à convergent brut de fonderie : C = 0,984.

Le rapport $\frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}}$ se symbolise parfois par la lettre α et s'appelle alors le « coefficient de débit ».
Le coefficient de détente ε se calcule à partir de l'équation suivante :

$$\varepsilon = \left[\left(\frac{\kappa\tau^{\frac{2}{\kappa}}}{\kappa-1}\right)\left(\frac{1-\beta^4}{1-\beta^4\tau^{\frac{2}{\kappa}}}\right)\left(\frac{1-\tau^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}{1-\tau}\right)\right]^{(}$$

avec :
κ = exposant isentropique (rapport de la capacité thermique massique à pression constante à la capacité thermique massique à volume constant.
τ = rapport des pressions p_2/p_1.
β = rapport des diamètres d/D.
Cette équation n'est applicable que si $\tau \geq 0{,}75$.
Se reporter au tableau 4.3 à titre indicatif pour les certaines valeurs de ε.

■ Principe de fonctionnement du débitmètre à Pitot moyenné

Le tube de Pitot moyenne installé sur les installations hydrauliques fonctionne sur le même principe que celui destiné aux installations aérauliques (voir partie A), sauf qu'il mesure la pression totale en plusieurs points, et non un seul en bout d'étrave, et en calcule la moyenne.

Tableau 4.3 – Venturi – coefficient de détente ε (doc. AFNOR)

Rapport des diamètres		Coefficient de détente, ε, pour p^2/p^1 égal à								
β	$β^4$	1,00	0,98	0,96	0,94	0,92	0,90	0,85	0,80	0,75
				pour κ = 1,2						
0,300 0	0,008 1	1,000 0	0,987 4	0,974 5	0,961 6	0,948 6	0,935 4	0,902 1	0,867 8	0,832 7
0,562 3	0,100 0	1,000 0	0,985 6	0,971 2	0,956 8	0,942 3	0,927 8	0,891 3	0,854 3	0,816 9
0,668 7	0,200 0	1,000 0	0,983 4	0,966 9	0,950 4	0,934 1	0,917 8	0,877 3	0,837 1	0,797 0
0,740 1	0,300 0	1,000 0	0,980 5	0,961 3	0,942 4	0,923 8	0,905 3	0,860 2	0,816 3	0,773 3
0,750 0	0,316 4	1,000 0	0,980 0	0,960 3	0,940 9	0,921 8	0,903 0	0,857 1	0,812 5	0,769 0
				pour κ = 1,3						
0,300 0	0,008 1	1,000 0	0,988 3	0,976 4	0,964 5	0,952 4	0,940 2	0,909 2	0,877 3	0,844 5
0,562 3	0,100 0	1,000 0	0,986 7	0,973 4	0,960 0	0,946 6	0,933 1	0,899 0	0,864 5	0,829 4
0,668 7	0,200 0	1,000 0	0,984 6	0,969 3	0,954 1	0,938 9	0,923 7	0,885 9	0,848 1	0,810 2
0,740 1	0,300 0	1,000 0	0,982 0	0,964 2	0,946 6	0,929 2	0,912 0	0,869 7	0,828 3	0,787 5
0,750 0	0,316 4	1,000 0	0,981 5	0,963 2	0,945 2	0,927 4	0,909 8	0,866 7	0,824 6	0,783 3
				pour κ = 1,4						
0,300 0	0,008 1	1,000 0	0,989 1	0,978 1	0,967 0	0,955 7	0,944 4	0,915 4	0,885 5	0,854 6
0,562 3	0,100 0	1,000 0	0,987 7	0,975 3	0,962 8	0,950 3	0,937 7	0,905 8	0,873 3	0,840 2
0,668 7	0,200 0	1,000 0	0,985 7	0,971 5	0,957 3	0,943 0	0,928 8	0,893 3	0,857 7	0,821 9
0,740 1	0,300 0	1,000 0	0,983 2	0,966 7	0,950 3	0,934 0	0,917 8	0,878 0	0,838 8	0,800 0
0,750 0	0,316 4	1,000 0	0,982 8	0,965 8	0,948 9	0,932 3	0,915 8	0,875 2	0,835 3	0,796 0
				pour κ = 1,66						
0,300 0	0,008 1	1,000 0	0,990 8	0,981 5	0,972 1	0,962 5	0,952 9	0,928 1	0,902 4	0,875 8
0,562 3	0,100 0	1,000 0	0,989 6	0,979 1	0,968 5	0,957 8	0,947 1	0,919 7	0,891 7	0,862 9
0,668 7	0,200 0	1,000 0	0,987 9	0,975 9	0,963 7	0,951 6	0,939 4	0,908 8	0,877 8	0,846 4
0,740 1	0,300 0	1,000 0	0,985 8	0,971 8	0,957 7	0,943 8	0,929 9	0,895 8	0,860 9	0,826 5
0,750 0	0,316 4	1,000 0	0,985 4	0,971 0	0,956 6	0,942 3	0,928 1	0,892 8	0,857 7	0,822 8

Note : ce tableau est donné à titre indicatif. Il n'est pas prévu pour une interpolation précise. L'extrapolation n'est pas permise.

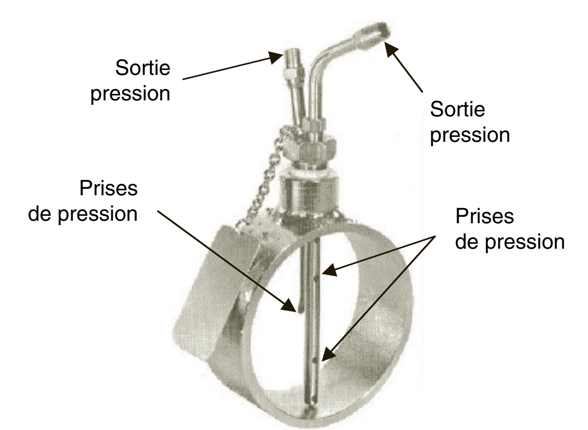


Figure 4.52 – Débitmètre à tube de Pitot moyenné (doc. Emerson-Annubar-Auxitrol)

Le principe de fonctionnement du tube de Pitot moyenné repose donc sur la mesure simultanée de deux pressions distinctes ; la pression totale moyennée dans la veine de fluide et la pression statique régnant dans le conduit, permettant de calculer la pression dynamique et d'en déduire la vitesse correspondante.

$$Pt = Ps + Pd$$

avec :
Pt = pression totale (Pa).
Ps = pression statique (Pa).
Pd = pression dynamique (Pa).
On peut facilement en déduire :

$$Pd = Pt - Ps = \Delta P$$

En adaptant le théorème de Bernouilli au cas des fluides compressible et non visqueux (voir 3.1), on peut en déduire l'équation de la vitesse du fluide en fonction de la pression dynamique ΔP :

$$V = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

avec :
V = vitesse au point de mesure (m/s).
ΔP = pression dynamique du fluide (Pa).
ρ = masse volumique du fluide (kg/m^3).
Les tubes de Pitot moyennés présentent l'avantage d'être de construction très simple et de mise en place facile. Le perçage d'un trou sur la génératrice supérieure de la canalisation suffit, et cela est réalisable aussi sur des canalisations en (faible) charge moyennant un outillage adapté.
Pour plus de détail, on pourra se reporter au chapitre 3.1.

■ Principe de fonctionnement du débitmètre laminaire

Le débitmètre laminaire fonctionne aussi suivant le principe de la mesure du ΔP en considérant le fait que la perte de charge d'un fluide est proportionnelle au débit. Afin d'éviter les turbulences en diminuant le nombre de Reynolds, le stabilisateur de flux est inclus dans l'équipement sous la forme de panneaux gaufrés formant des canaux dans lesquels circule le fluide.
Il est assez rarement utilisé pour un liquide, mais il l'est couramment pour des gaz.

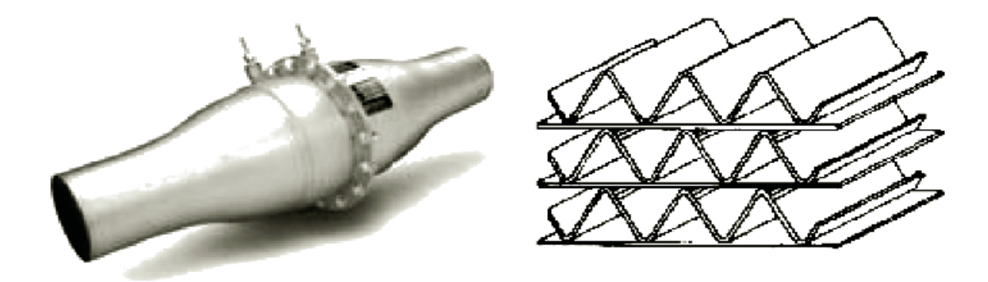


Figure 4.53 – Débitmètre laminaire et détail des canaux (doc. Meriam-Engineering Mesures)

De part leur construction, les débitmètres permettent de mesurer les débits avec une grande précision mais sous réserve que ceux-ci soient propres pour éviter toute obstruction des canaux.

Principe de fonctionnement du débitmètre à V-cône

Comme pour le débitmètre laminaire, le débitmètre à V-cône stabilise lui-même le fluide pour permettre un mesurage plus précis. La position centrale du cône optimise l'homogénéité de la vitesse dans les champs de mesurage.

Pour mesurer le ΔP , une prise de pression est placée en amont du cône, et l'autre se situe dans la face aval du cône lui-même.

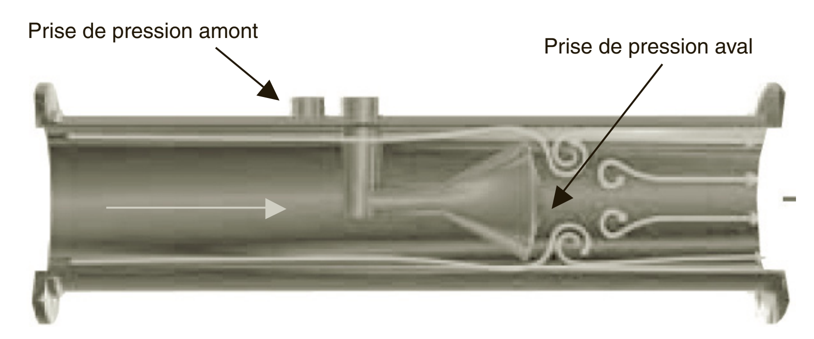


Figure 4.54 – Débitmètre V-cône (doc. McCrometer-Engeering Mesures)

Principe de fonctionnement du débitmètre à coin

Appelé « wedge meter », le débitmètre à coin est aussi adapté pour les liquides chargés et/ou visqueux.

Son principe de fonctionnement repose sur la présence d'un obstacle calibré dans la veine liquide et qui crée une constriction connue. La pression est mesurée en aval et en amont afin de connaître l'écart et de déterminer le débit avec les courbes de calibration.

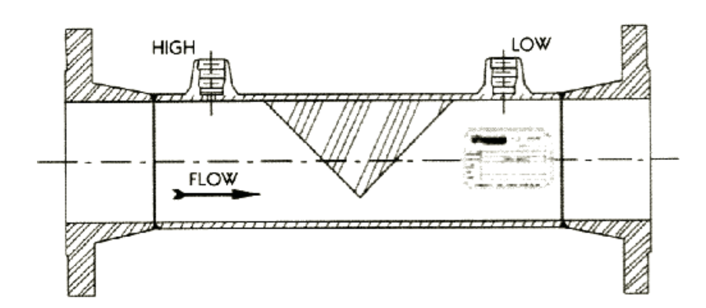


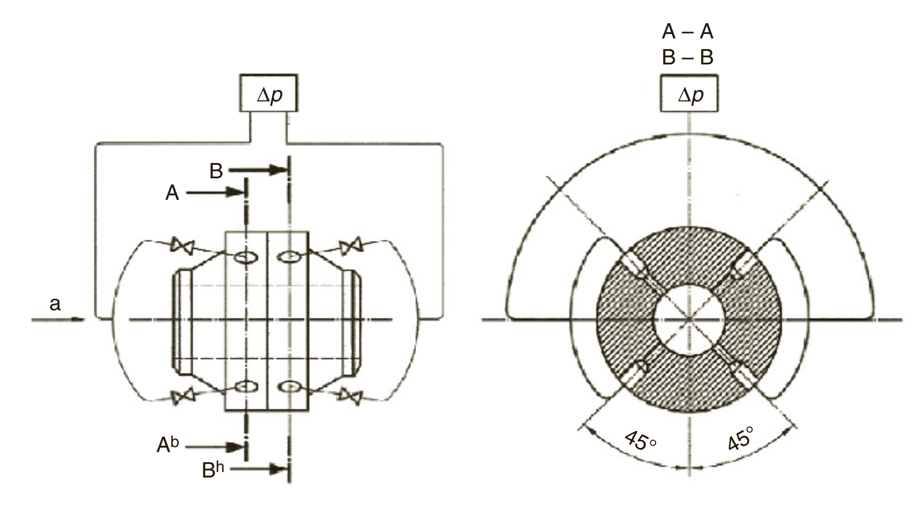
Figure 4.55 – Débitmètre à coin (doc. Preso-Engineering Mesures)

4.9.2 Principes de mesurage

Principe de mesurage avec un débitmètre à diaphragme

Le principe de la méthode de mesurage consiste donc à déduire la valeur du débit en fonction des caractéristiques dimensionnelles du diaphragme, de la pression différentielle « amont-aval » et des caractéristiques du fluide en écoulement.

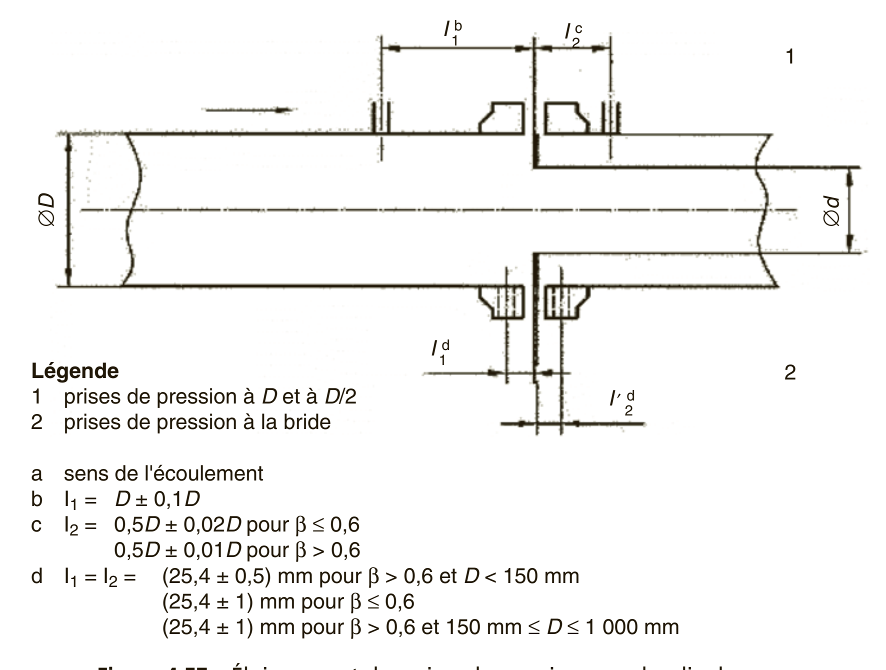
La figure 4.56 indique la position des prises de pression en amont (A) et en aval (B). En faisant des doubles mesures, on moyenne ainsi l'erreur de mesure de pression.



a Sens de l'écoulement

b Section A-A (amont), caractéristique valable aussi pour la section B-B (aval)

Figure 4.56 – Diaphragme avec prises de pression raccordées en « triple T » (doc. AFNOR)



Légende

1 prises de pression à D et à $D/2$

2 prises de pression à la bride

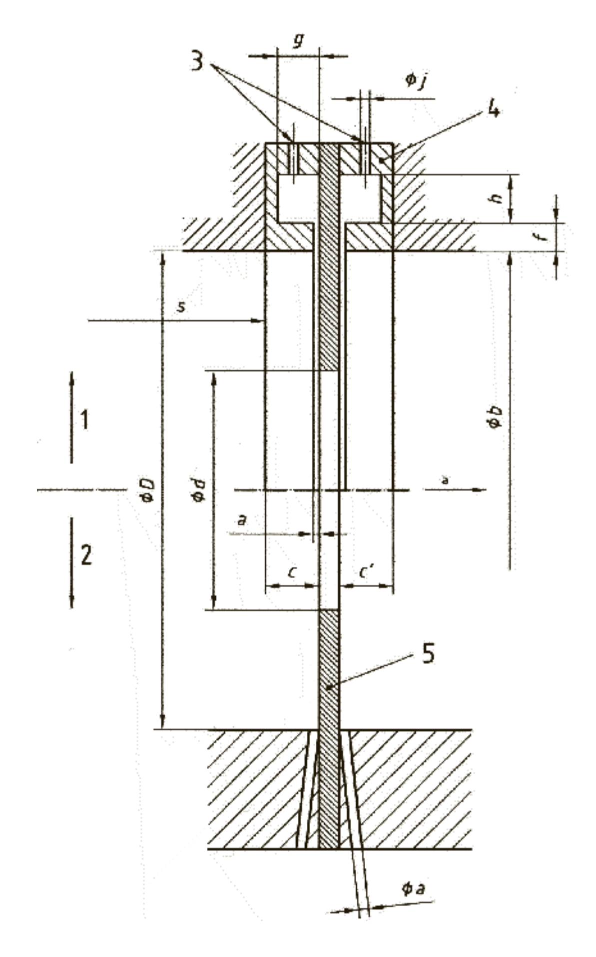
a sens de l'écoulement

b $l_1 = D \pm 0{,}1D$

c $l_2 = 0{,}5D \pm 0{,}02D$ pour $\beta \leq 0{,}6$
$0{,}5D \pm 0{,}01D$ pour $\beta > 0{,}6$

d $l_1 = l_2 =$ (25,4 ± 0,5) mm pour $\beta > 0{,}6$ et $D < 150$ mm
(25,4 ± 1) mm pour $\beta \leq 0{,}6$
(25,4 ± 1) mm pour $\beta > 0{,}6$ et 150 mm $\leq D \leq$ 1 000 mm

Figure 4.57 – Éloignement des prises de pression pour les diaphragmes à D et D/2 et à prises de pression à la bride (doc. AFNOR)



Légende

1	bague porteuse avec fente annulaire	*f*	=	épaisseur de la fente
2	prises individuelles	*c*	=	longeur de la bague amont
3	prises de pression	*c'*	=	longeur de la bague aval
4	bague porteuse	*b*	=	diamètre de la bague porteuse
5	plaque du diaphragme	*a*	=	largeur de la fente annulaire ou diamètre de la prise individuelle
		s	=	éloignement du premier écart de diamètre amont de la bague porteuse
a	sens de l'écoulement	*g, h*	=	diemnsions de la chambre annulaire
		∅*j*	=	diamètre de la prise de pression dans la chambre

Figure 4.58 – Éloignement des prises de pression dans les angles pour les diaphragmes (doc. AFNOR)

– pour $\beta \leq 0{,}65$: $0{,}005\ D \leq a \leq 0{,}03\ D$;
– pour $\beta > 0{,}65$: $0{,}01\ D \leq a \leq 0{,}02\ D$.

Si $D < 100$ mm, une valeur de a jusqu'à 2 mm est acceptable pour toute valeur de β.
Pour toute valeur de β dans le cas d'un fluide propre ; 1 mm $\leq a \leq$ 10 mm.

Tableau 4.4 – Longueurs droites minimales nécessaires en amont et en aval d'un diaphragme (doc. AFNOR)Valeurs exprimées en multiples du diamètre intérieur, *D*

Rapport des diamètres β	En amont (entrée) du diaphragme																								En aval (sortie) du diaphragme	
	Coude simple à 90° Deux coudes à 90° dans un plan quelconque ($S > 30D$)[a]		Deux coudes à 90° dans le même plan : Configuration *S* ($30D \geq à \geq 10D$)[a]		Deux coudes à 90° dans le même plan : Configuration *S* ($10D > S$)[a]		Deux coudes à 90° dans des plans perpendiculaires ($30D \geq S \geq 5D$)[a]		Deux coudes à 90° dans des plans perpendiculaires ($5D \geq S$)[a, b]		Té simple à 90° avec ou sans extension		Coude simple à 45° Deux coudes à 45° dans le même plan : Configuration *S* ($S \geq 2D$)[a]		Réduction concentrique de 2*D* à *D* sur une longueur de 1,5*D* à 3*D*		Évasement concentrique de 0,5*D* à *D* concentriqsur une longueur de *D* à 2*D*		Robinet sphérique ou robinet à opercule grand ouvert		Brusque réduction symétrique		Logement de thermomètre (gaine thermo-métrique) $\leq 0{,}03D$[d]		Accessoires (colonnes 2 à 11) et proche à densimètre	
1	2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		12		13		14	
–	A[e]	B[f]	A[e]	B[f]	A[e]	B[f]	A[e]	B[f]	A[e]	B[f]	A[e]	B[f]	A[e]	B[f]	A[e]	B[f]	A[e]	B[f]	A[e]	B[f]	A[e]	B[f]	A[e]	B[f]	A[e]	B[f]
≤ 0,20	6	3	10	9	10	9	19	18	34	17	3	9	7	9	5	9	6	9	12	6	30	15	5	3	4	2
0,40	16	3	10	9	10	9	44	18	50	25	9	3	30	9	9	9	12	8	12	6	30	15	5	3	6	3
0,50	22	9	18	10	22	10	44	18	75	34	19	9	30	18	8	5	20	9	12	6	30	15	5	3	6	3
0,60	42	13	30	18	42	18	44	18	65[h]	25	29	15	30	18	9	5	26	11	14	7	30	15	5	3	7	3,5
0,67	44	20	44	18	44	20	44	20	60	18	35	15	44	18	12	6	28	14	18	9	30	15	5	3	7	3,5
0,75	44	20	44	18	44	22	44	20	75	18	44	15	44	18	13	8	36	18	24	12	30	15	5	3	8	4

Note 1 : Les longueurs droites minimales nécessaires sont des longueurs entre divers accessoires situés en amont ou en aval du diaphragme, et le diaphragme lui-même. Les longueurs droites doivent être mesurées à partir de l'extrémité aval de la partie incurvée du coude le plus proche (ou du seul coude) ou du té ou de l'extrémité aval de la partie incurvée ou conique de la réduction ou de l'évasement.

Note 2 : La plupart des coudes sur lesquels sont basées les longueurs de ce tableau ont un rayon de courbe églal à 1,5*D*.

a. S est la distance entre les deux coudes, mesurée de l'extrémité aval de la partie incurvée du coude amont à l'extrémité amont de la partie incurvée du coude aval.
b. Ce a n'est pas une bonne installation en amont, il convient d'utiliser un conditionneur d'écoulement quand cela est possible.
c. L'installation de logements de thermomètres (gaines thermométriques) ne changera pas les longueurs droites miminma est nécessaires en amopnt pour les autres accesssoires.
e. La colonne A de chaque accessoire donne des longueurs corrrepondant à des valeurs d'incertitude supplémentaire nulles.
f. La colonne B de chaque accessoire donne des longueurs correpsondant à des valeurs d'incertitude supplménentaire de 0,6 %.
g. La longueur droite mentionnée dans la colonne A donne une incertitude additionnelle nulle. Il n'y a pas de données dipsonibles pour ces longueurs droites plus courte qui pourraient être utilisées pour donner des longueurs croisées nécessaires pour la colonne B.
h. Une longueur droite de 95*D* est nécessaire pour $Re_D > 2 \times 10^6$ si $S < 2D$.

Ces types d'appareils déprimogènes noyés exigent de recourir à l'emploi de grandes longueurs droites de part et d'autre de l'appareil, ces longueurs étant plus grandes lorsqu'une singularité relativement proche provoque des perturbations de l'écoulement.

On notera sur le tableau 4.4 que les longueurs minimales à respecter croissent avec le rapport de diamètres $\frac{d}{D} = \beta$ de l'appareil.

Les longueurs spécifiées dans le tableau 4.4 doivent être considérées comme des valeurs minimales. Pour des travaux de recherche ou d'étalonnage en particulier, il est recommandé de doubler au moins les valeurs en amont afin de minimiser l'incertitude de mesurage.

Lorsque les longueurs droites utilisées sont supérieures ou égales aux valeurs spécifiées dans les colonnes A pour l'incertitude supplémentaire nulle, il n'est pas nécessaire d'augmenter le coefficient de décharge *C*.

Lorsque la longueur droite d'amont ou d'aval est inférieure à la valeur indiquée dans les colonnes A, tout en étant supérieure ou égale aux valeurs figurant dans les colonnes B correspondant à l' « incertitude supplémentaire de 0,5 % », une incertitude supplémentaire de 0,5 % doit être ajoutée d'une manière arithmétique à l'incertitude du coefficient de décharge *C*.

Afin d'obtenir un régime d'écoulement complètement établi en supprimant notamment les phénomènes de giration du fluide dans la conduite, il conviendra de mettre en place un redresseur d'écoulement ou conditionneur d'écoulement. Cela est nécessaire lorsque les longueurs droites en amont sont insuffisantes lorsque l'installation existante n'a pas la géométrie requise ou si l'on souhaite obtenir un meilleur niveau d'incertitude de mesure.

Ces deux types de « stabilisateur » font l'objet d'essais de conformité normalisés qu'il n'est pas nécessaire de développer dans le cadre du présent ouvrage mais on peut retenir les différents modèles suivants :

☐ Redresseur d'écoulement

Un redresseur d'écoulement est un appareil qui élimine ou réduit considérablement les perturbations, mais qui peut ne pas respecter le rapport de vitesse axiale locale sur la vitesse axiale maximale de 5 %.

Il en existe principalement 3 modèles.

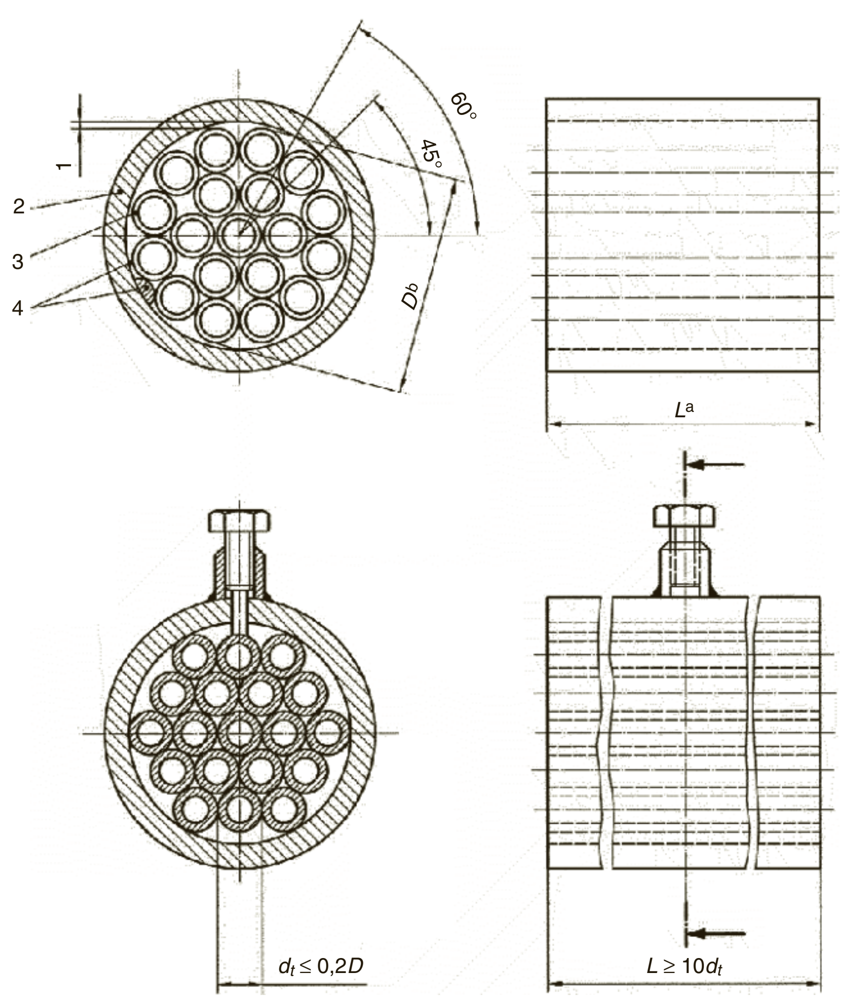
le redresseur à faisceau de 19 tubes

Il consiste en un faisceau de tubes parallèles et tangents entre eux, fixés les uns aux autres et maintenus à l'intérieur de la conduite.

Lors de la pause, il est impératif de s'assurer du parallélisme des tubes avec l'axe de la conduite.

Les dimensions du stabilisateur doivent répondre aux caractéristiques suivantes :

– $0{,}95\,D \leq D_f \leq D$
– $L \geq 10\,d_t$
– $2D \leq L \leq 3D$



Légende

1 espace à réduire au minimum
2 paroi de la conduite
3 épaisseur de la paroi de tube (inférieure à $0{,}025D$)
4 emplacements optionnels pour cales de centrage (d'ordinaire 4 emplacements)

a la longeur, L, doit se situer entre $2D$ et $3D$, de préférence le plus proche possible de $2D$
b D_f est le diamètre extérieur du redresseur d'écoulement, et $0{,}95D \leq D_f \leq D$

Figure 4.59 – Redresseur à faisceau de 19 tubes (doc. AFNOR)

avec:
D = diamètre intérieur de la conduite.
D_f = diamètre extérieur du redresseur.
L = longueur du redresseur.
d_t = diamètre extérieur du tube constituant le faisceau.
Les longueurs droites à respecter entre les diaphragmes et les redresseurs d'écoulement à 19 tubes sont les suivantes :

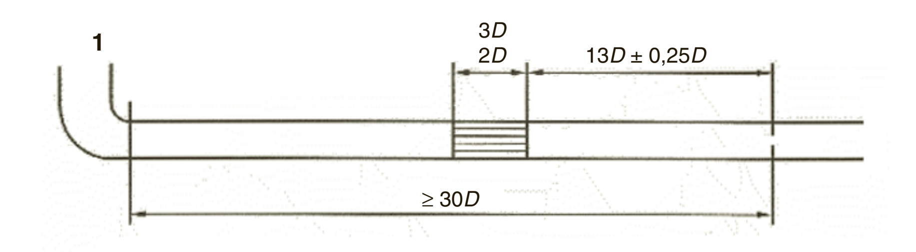
Tableau 4.5 – Exemples de distances entre accessoire, diaphragme et stabilisateur (doc. AFNOR)

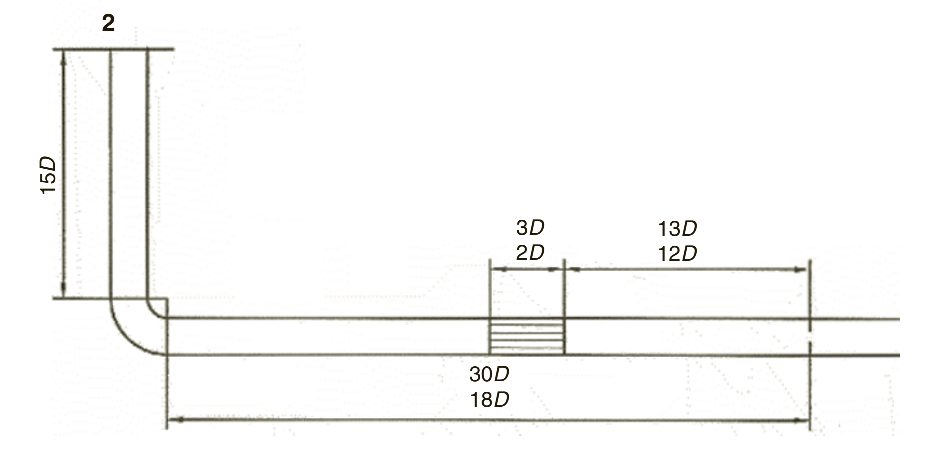
Valeurs exprimées en multiples du diamètre intérieur, *D*

Rapport des diamètres β	Coude simple à 90° [b]				Deux coudes à 90° [b] dans des plans perpendiculaires ($2D \geq S$) [a]				Té simple à 90°				Tout accessoire			
	$30 > L_f \geq 18$		$L_f \geq 30$		$30 > L_f \geq 18$		$L_f \geq 30$		$30 > L_f \geq 18$		$L_f \geq 30$		$30 > L_f \geq 18$		$L_f \geq 30$	
1	2		3		4		5		6		7		8		9	
–	A[c]	B[d]	A[c]	B[d]	A[c]	B[d]	A[c]	B[d]	A[c]	B[d]	A[c]	B[d]	A[c]	B[d]	A[c]	B[d]
≤ 0,2	5 à 14,5	1 à n[e]	5 à 25	1 à n[e]	5 à 14,5	1 à n[e]	5 à 25	1 à n[e]	5 à 14,5	1 à n[e]	1 à 25	1 à n[e]	5 à 11	1 à n[e]	5 à 13	1 à n[e]
0,4	5 à 14,5	1 à n[e]	5 à 25	1 à n[e]	5 à 14,5	1 à n[e]	5 à 25	1 à n[e]	5 à 14,5	1 à n[e]	1 à 25	1 à n[e]	5 à 11	1 à n[e]	5 à 13	1 à n[e]
0,5	11,5 à 14,5	3 à n[e]	11,5 à 25	3 à n[e]	9,5 à 14,5	1 à n[e]	9 à 25	1 à n[e]	11 à 13	1 à n[e]	9 à 23	1 à n[e]	fg	3 à n[e]	11,5 à 14,5	3 à n[e]
0,6	12 à 13	5 à n[e]	12 à 25	5 à n[e]	13,5 à 14,5	6 à n[e]	9 à 25	1 à n[e]	f h	7 à n[e]	11 à 16	1 à n[e]	f	7 à n[e]	12 à 16	6 à n[e]
0,67	13	7 à n[e]	13 à 16,5	7 à n[e]	13 à 14,5	7 à n[e]	10 à 15	5 à n[e]	f	8 à n[e]	11 à 13	6 à n[e]	f	8 à 10	13	6 à n[e]
0,75	14	8 à n[e]	14 à 16,5	8 à n[e]	f	9,5 à n[e]	12 à 12,5	8 à n[e]	f	9 à n[e]	12 à 14	7 à n[e]	f	9,5	f	7 à n – 1,5[e]
Recom-mandé	13 pour $\beta \leq 0,67$	13 pour $\beta \leq 0,75$	14 à 16,5 pour $\beta \leq 0,75$	14 à 16,5 pour $\beta \leq 0,75$	13,5 à 14,5 pour $\beta \leq 0,67$	13,5 à 14,5 pour $\beta \leq 0,75$	12 à 12,5 pour $\beta \leq 0,75$	12 à 12,5 pour $\beta \leq 0,75$	13 pour $\beta \leq 0,54$	13 pour $\beta \leq 0,75$	12 à 13 pour $\beta \leq 0,75$	12 à 13 pour $\beta \leq 0,75$	9,5 pour $\beta \leq 0,46$	9,5 pour $\beta \leq 0,75$	13 pour $\beta \leq 0,67$	13 pour $\beta \leq 0,75$

Note : Les longueurs droites données dans le présent tableau sont les longueurs autorisées entre l'extrémité aval d'un redresseur d'écoulement à faisceau de 19 tubes (1998) et le diagphragme, étant donné qu'un accessoire particulier est installé en amont du redresseur d'écoulement à faisceau de 19 tubes (1998) à une distance L_f du diaphragme. La distance L_f à partir du diaphragme est mesurée à l'extrémité aval de la partie incurvée du coude le plus proche (ou du seul coude) ou du té, ou à l'extrémité aval de la partie incurvée ou conique de la réduction ou de l'évasement. Les valeurs recommandées indiquent les emplacements du faisceau de tubes applicables sur une plage spécifiée de Y.

a S est la distance entre les deux coudes, mesurée de l'extrémité aval de la partie incurvée du code amont à l'extrémité amont de la partie incurvée du coude aval.
b Il convient que les coudes aient un rayon de courbure égal à 1,5D.
c La colonne A de chaque accessoire donne des longueurs correpondant à des valeurs d'« incertitude supplémentaire nulles ».
d La colonne B de chaque accessoire donne des longueurs correspondant à des valeurs d'« incertitude supplémentaire de 0,5 % ».
e n est le nombre de diamètres nécessaire pour que l'extrémité amont du redresseur d'écoulement à faisceau de 19 tubes (1998) soit située à 1D de l'extrémité aval de la partie incurvée ou conique de l'accessoire le plus proche. Il est souhaitable que la longueur entre l'extrémité amont du redresseur d'écoulement à faisceau de 19 tubes (1998) et de l'extrémité avant de la partie incurvée ou conique de l'accessoire la plus proche soit d'au moins 2,5D, sauf si ce 2 ne donne pas une valeur acceptable pour la distance entre le diaphrame et l'extrémité aval du redresseur d'écoulement à faisceau de 19 tubes (1998).
f Il n'est pas possible de trouver un emplacement acceptable pour un redresseur d'écoulement à faisceau de 19 tubes (1998) en aval de l'accessoire particulier pour toutes les valeurs de la L_f auxquelles s'appplique la colonne.
g Si $\beta = 0,46$, une valeur de 9,5 est possible.
h Si $\beta = 0,54$, une valeur de 13 est possible.





Légende

1 emplacement de tout accessoire placé à n'importe quelle distance en amont du coude simple

2 emplacement de l'accessoire précédent, placé avant une longueur droite requise en amont du coude simple

Figure 4.60 – Redresseur en aval d'un coude (doc. AFNOR)

La perte de charge de ce type de stabilisateur est estimée à :

$$\Delta p_c = 0{,}75\left(\frac{\rho V^2}{2}\right)$$

avec :

ρ = masse volumique du fluide.

V = vitesse axiale moyenne du fluide dans la conduite.

Il y a lieu de se rapprocher du fabricant pour déterminer plus exactement les dimensions du conditionneur en fonction du débit et du diamètre de la canalisation.

Le redresseur AMCA

Il consiste en un nid-d'abeilles à mailles carrées de paroi très minces.

La perte de charge de ce type de stabilisateur est estimée à :

$$\Delta p_c = 0{,}25\left(\frac{\rho V^2}{2}\right)$$

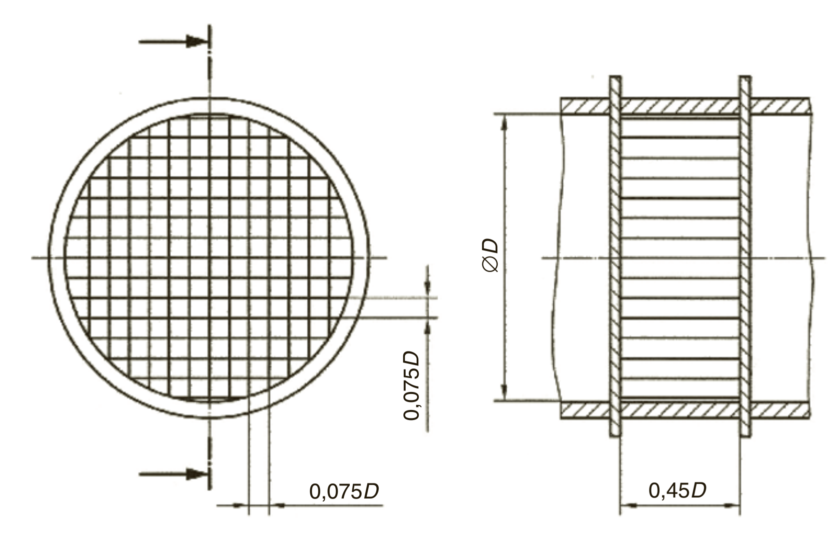


Figure 4.61 – Redresseur type AMCA (doc. AFNOR)

Le redresseur en étoile

Il est constitué de huit aubes radiales angulairement équidistantes et de très faible épaisseur.

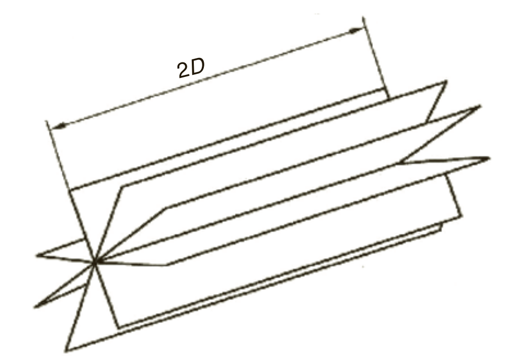


Figure 4.62 – Redresseur en étoile (doc. AFNOR)

La perte de charge de ce type de stabilisateur est estimée à :

$$\Delta p_c = 0{,}25\left(\frac{\rho V^2}{2}\right)$$

□ Conditionneur d'écoulement

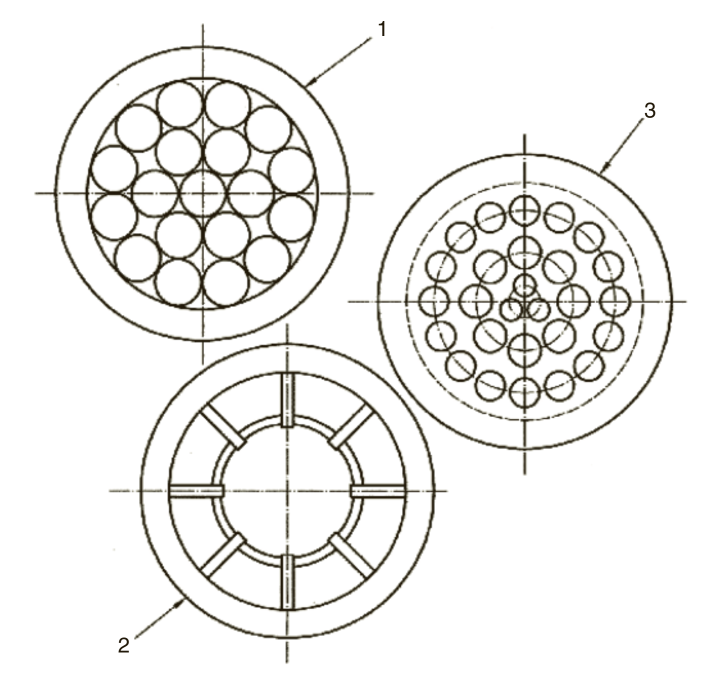
Un conditionneur permet de réduire à la fois les perturbations et d'obtenir un rapport de vitesse axiale à la vitesse maximale dans la section d'au plus 5 %. Il est généralement constitué d'une plaque perforée.

Par rapport au redresseur d'écoulement, le conditionneur d'écoulement présente aussi l'avantage d'un encombrement plus réduit dans la conduite, de l'ordre de $D/8$ à moins de $2D$.

Il en existe principalement 6 modèles.

Le conditionneur GALLAGHER

Il se compose d'un dispositif anti-tourbillon (1), d'une chambre de conditionnement (2) et de l'appareil profilé (3).



Légende

1 dispositif antitourbillon (modèles à tubes) : faisceau concentrique uniforme à 19 tubes (éventuellement monté sur broches)

2 dispositif antitourbillon (modèles à aubes) : 8 aubes de longueur 0,125*D* à 0,25*D*, concentriques par rapport à la conduite (le dispositif peut être placé à l'entrée du passage de mesure)

3 appareil profilé : modèle 3-8-16 (voir la note ci-dessous)

NOTE Le modèle 3-8-16 pour un appareil profilé se présente comme suit :

– 3 trous sur un diamètre de cercle de 0,15*D* à 0,155*D* ; leur diamètre est tel que la somme de leurs aires est comprise entre 3 % et 5 % de l'aire de la conduite ;
– 8 trous sur un diamètre de cercle de 0,44*D* à 0,48*D* ; leur diamètre est tel que la somme de leurs aires est comprise entre 19 % et 21 % de l'aire de la conduite ;
– 3 trous sur un diamètre de cercle de 0,81*D* à 0,85*D* ; leur diamètre est tel que la somme de leurs aires est comprise entre 25 % et 29 % de l'aire de la conduite.

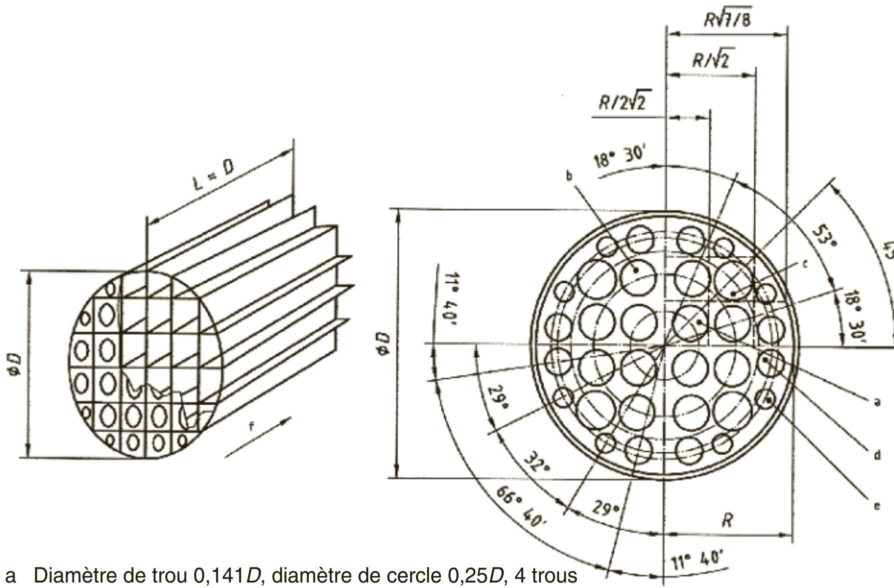
Figure 4.63 – Conditionneur Gallagher (doc. AFNOR)

La perte de charge de ce type de stabilisateur est estimée à :

$$\Delta p_c = 2\left(\frac{\rho V^2}{2}\right)$$

Les conditionneurs ZANKER

Le conditionneur ZANKER est constitué d'une plaque percée de trous de dimensions particulières et suivis de canaux (Figure 4.64) ou d'une simple plaque perforée (Figure 4.65)



a Diamètre de trou 0,141*D*, diamètre de cercle 0,25*D*, 4 trous
b Diamètre de trou 0,139*D*, diamètre de cercle 0,56*D*, 8 trous
c Diamètre de trou 0,136 5*D*, diamètre de cercle 0,75*D*, 4 trous
d Diamètre de trou 0,11*D*, diamètre de cercle 0,85*D*, 8 trous
e Diamètre de trou 0,077*D*, diamètre de cercle 0,90*D*, 8 trous
f Sens de l'écoulement

Figure 4.64 – Conditionneur type Zanker avec canaux (doc. AFNOR)

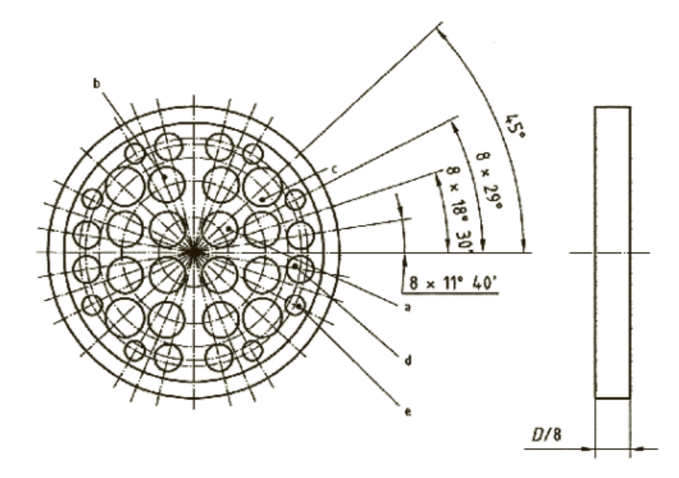


Figure 4.65 – Conditionneur type Zanker à plaque (doc. AFNOR)

a Diamètre de trou 0,141*D*, diamètre de cercle 0,25*D*, 4 trous
b Diamètre de trou 0,139*D*, diamètre de cercle 0,56*D*, 8 trous
c Diamètre de trou 0,136 5*D*, diamètre de cercle 0,75*D*, 4 trous
d Diamètre de trou 0,11*D*, diamètre de cercle 0,85*D*, 8 trous
e Diamètre de trou 0,077*D*, diamètre de cercle 0,90*D*, 8 trous

Les distances à respecter dans les deux cas ci-dessus sont les suivantes :

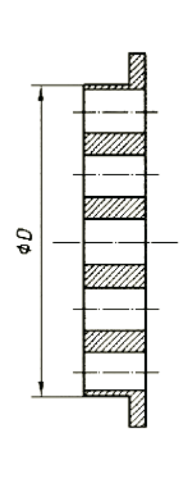
– $L_f \geq 17\ D$
– $7{,}5\ D \leq L_s \leq L_f - 8{,}5\ D$

avec :
L_f : distance entre le diaphragme et l'accessoire le plus proche.
L_s : distance entre la face aval du conditionneur et le diaphragme.
D : diamètre intérieur de la conduite.
La perte de charge du stabilisateur Zanker est estimée à :

$$\Delta p_c = 5\left(\frac{\rho V^2}{2}\right)$$

La perte de charge du stabilisateur Zanker à plaque est estimée à :

$$\Delta p_c = 3\left(\frac{\rho V^2}{2}\right)$$



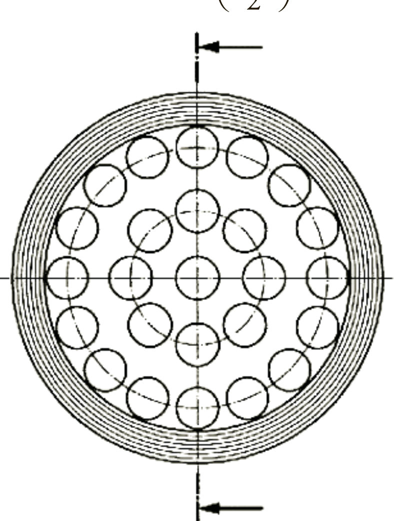


Figure 4.66 – Conditionneur type NOVA K-Lab (doc. AFNOR)

La perte de charge de ce type de stabilisateur est estimée à :

$$\Delta p_c = 2\left(\frac{\rho V^2}{2}\right)$$

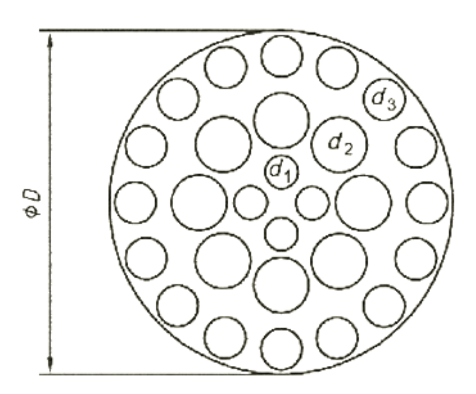


Figure 4.67 – Conditionneur à plaque type NEL-Spearman (doc. AFNOR)

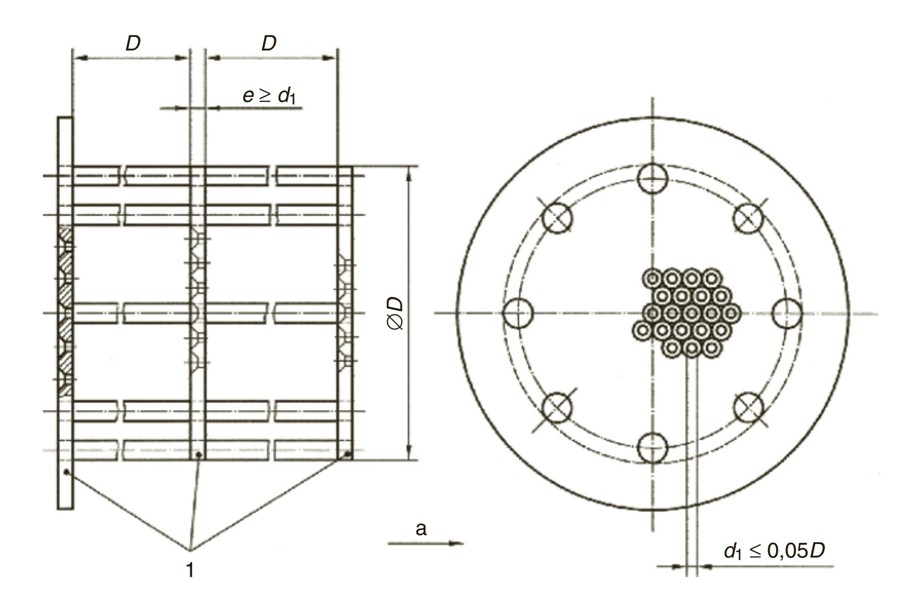
En fonction du diamètre D de la canalisation, il y aura :

– une couronne de 4 trous d_1 de diamètre 0,10 D sur un diamètre de cercle 0,18 D ;
– une couronne de 8 trous d_2 de diamètre 0,16 D sur un diamètre de cercle 0,48 D ;
– une couronne de 16 trous d_3 de diamètre 0,12 D sur un diamètre de cercle 0,86 D.

L'épaisseur de la plaque perforée est de 0,12 D.

La perte de charge de ce type de stabilisateur est estimée à :

$$\Delta p_c = 3{,}2\left(\frac{\rho V^2}{2}\right)$$



Légende
1 Plaques
a Sens de l'écoulement

Figure 4.68 – Conditionneur type Sprenkle (doc. AFNOR)

La perte de charge de ce type de stabilisateur est estimée à :

$$\Delta p_c = 11\left(\frac{\rho V^2}{2}\right)$$

Comme on peut le voir, les pertes de pression engendrées selon le modèle de redresseur ou de conditionneur, ainsi que la qualité de stabilisation souhaitée sont des paramètres de choix à étudier avec les constructeurs.

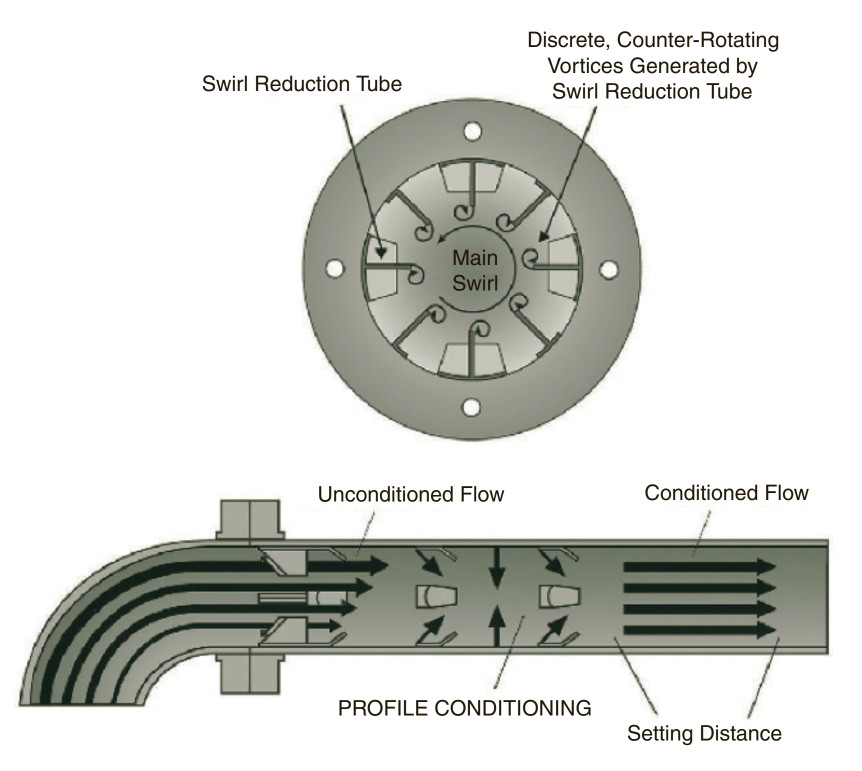


Figure 4.69 – Conditionneur type VORTAB (doc. Engineering Mesures)

La figure 4.70 précise le mode de raccordement du diaphragme par en dessous. Cette position permet d'éviter d'amener de l'air dans le capteur situé au-dessus. On peut toutefois s'en assurer en purgeant la partie basse du réseau par les vannes 4 et 5 du manifold.

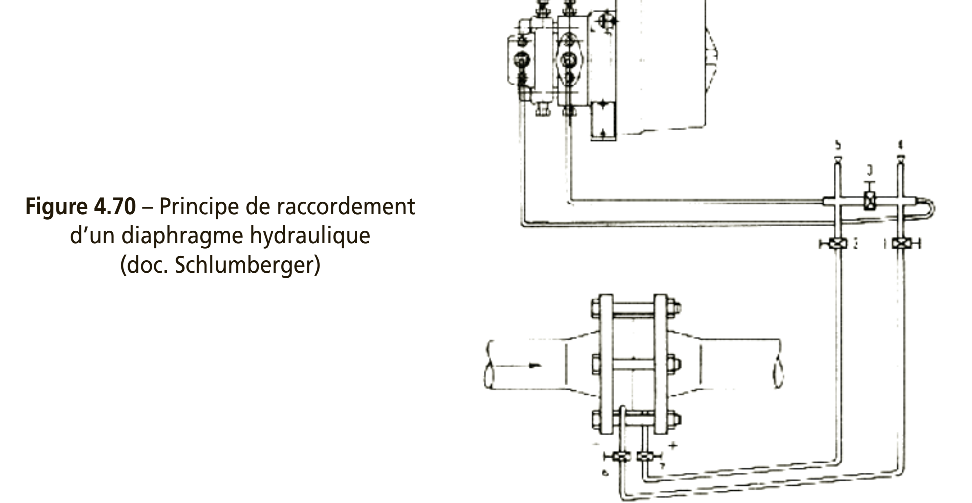


Figure 4.70 – Principe de raccordement d'un diaphragme hydraulique (doc. Schlumberger)

Il est à noter que le raccordement par en dessous risque de drainer des boues. Si le diaphragme n'est pas connecté en permanence, il faudra absolument faire une chasse rapide en ouvrant les vannes 6 et 7 avant tout raccordement. Sinon, les matières solides qui se sont éventuellement déposées risquent d'obstruer les canaux du capteur.
La masse volumique du fluide contenu dans chacune des conduites de liaison doit être identique et il faut qu'elles soient à la même température.

■ Principe de mesurage avec un débitmètre à tuyère

Le tableau 4.6 permet de définir les longueurs droites nécessaires en amont en aval de la tuyère. En cas d'impossibilité matérielle, on pourra utiliser les stabilisateurs ou les conditionneurs décrits dans le chapitre relatif aux diaphragmes.
La précision que l'on peut attendre est de l'ordre de ± 1,5 % de la grandeur mesurée.

■ Principe de mesurage avec un débitmètre à tube de Venturi

Comme pour le diaphragme, le principe de la méthode de mesurage avec un tube de Venturi consiste à déduire la valeur du débit en fonction des caractéristiques dimensionnelles de l'élément déprimogène, de la pression différentielle « amont-aval » et des caractéristiques du fluide en écoulement.
Les longueurs droites minimales à prévoir en amont sont indiquées dans le tableau 4.7 en fonction de la nature des accessoires et du rapport β.
Les accessoires situés à plus de $4D$ en aval du tube de Venturi n'affectent pas l'exactitude du mesurage.
Les puits, ou poches, thermométriques ne doivent pas dépasser $0{,}13D$ en diamètre et être situées à au moins $4D$ en amont et en aval du plan des prises du tube de Venturi.
Si besoin, des conditionneurs d'écoulement peuvent être utilisés pour stabiliser le flux dans la conduite. Les modèles présentés au chapitre sur les diaphragmes conviennent s'ils satisfont à la norme ISO 5167-1.
La précision que l'on peut attendre est de l'ordre de ± 1,5 % de la grandeur mesurée.

■ Principe de mesurage avec un débitmètre à Pitot

La principale contrainte pour effectuer un mesurage le plus précis possible est de respecter les longueurs droites prescrites par le constructeur. Par défaut, on pourra se reporter au tableau relatif aux distances nécessaires pour les diaphragmes.
D'une manière générale, il convient de respecter un minimum de $10D$ en amont et $3D$ en aval.
La précision que l'on peut attendre est de l'ordre de ± 1,5 % de la grandeur mesurée.

■ Principe de mesurage avec un débitmètre laminaire

L'avantage de ce débitmètre est qu'il ne nécessite pas de longueur droite spécifique en amont tout en obtenant une bonne précision de mesure. Ce principe, basé sur la loi de Poiseuil, permet d'étendre la plage de mesure de 1 à 30.
La précision que l'on peut attendre est inférieur à ± 1 % de la grandeur mesurée.

Tableau 4.6 – Longueurs droites minimales nécessaires en amont et en aval d'une tuyère (doc. AFNOR)

Rapport des diamètres β[a]	En amont (entrée) de l'élément primaire																				En aval (sortie) de l'élément primaire	
	Coude ou té simple à 90° (éoulement provenant d'une seule branche)		Deux coudes ou plus à 90° dans le même plan		Deux coudes ou plus à 90° dans des plans différents		Réduction de 2*D* à *D* sur une longueur de 1,5*D* à 3*D*		Évasement de 0,5*D* à *D* sur une longueur de *D* à 2*D*		Robinet à soupape grand ouvert		Robinet sphérique ou robinet à opercule grand ouvert		Brusque réduction symétrique		Logement de thermomètre (gaine thermo-métrique)[b] de diamètre ≤ 0,03*D*		Logement de thermomètre (gaine thermo-métrique)[b] de diamètre entre 0,03*D* et 0,13*D*		Accessoires (colonnes 2 à 8)	
1	2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		12	
	A[c]	B[d]	A[c]	B[d]	A[c]	B[d]	A[c]	B[d]	A[c]	B[d]	A[c]	B[d]	A[c]	B[d]	A[c]	B[d]	A[c]	B[d]	A[c]	B[d]	A[c]	B[d]
0,20	10	6	14	7	34	17	5	e	16	8	18	9	12	6	30	15	5	3	20	10	4	2
0,25	10	6	14	7	34	17	5	e	16	8	18	9	12	6	30	15	5	3	20	10	4	2
0,30	10	6	16	6	34	17	5	e	16	8	18	9	12	6	30	15	5	3	20	10	4	2,5
0,35	12	6	16	8	36	18	5	e	16	8	18	9	12	6	30	15	5	3	20	10	4	2,5
0,40	14	7	18	9	36	18	5	e	16	8	20	10	12	6	30	15	5	3	20	10	6	3
0,45	14	7	18	9	38	19	5	a	17	9	20	10	12	6	30	15	5	3	20	10	6	3
0,50	14	7	20	10	40	20	6	5	18	9	22	11	12	6	30	15	5	3	20	10	6	3
0,55	16	8	22	11	44	22	8	5	20	10	24	12	14	7	30	15	5	3	20	10	6	3
0,60	18	9	26	13	48	24	9	5	22	11	26	13	14	7	30	15	5	3	20	10	7	3,5
0,65	22	11	32	16	54	27	11	6	25	13	28	14	16	8	30	15	5	3	20	10	7	3,5
0,70	28	14	36	18	62	31	14	7	30	15	32	16	20	10	30	15	5	3	20	10	7	3,5
0,75	36	18	42	21	70	35	22	11	38	19	36	18	24	12	30	15	5	3	20	10	8	4
0,80	46	23	50	25	80	40	30	15	54	27	44	22	30	15	30	15	5	3	20	10	8	4

Valeurs exprimées en multiples du diamètre intérieur, *D*

Tableau 4.6 – Longueurs droites minimales nécessaires en amont et en aval d'une tuyère (doc. AFNOR) *(suite)*

Note 1 : Les longueurs droites minimales nécessaires sont des longueurs entre divers accessoires situés en amont ou en aval de l'élément primaire, et l'élément primaire lui-même. Toutes les longueurs droites doivent être mesurées à partir de la face amont de l'élément primaire.
Note : Ces longueurs ne sont pas basées sur des données récentes.

a Pour certains types d'éléments primaires, toutes les valeurs de β ne sont pas permises.
b L'installation de logements de thermomètre (gaines thermométriques) ne changera pas les longueurs droites minimales nécessaires en amont pour les autres accessoires.
c La colonne A de chaque accessoire donne des longueurs corrrepondant à des valeurs d'« incertitude supplémentaire nulle ».
d La colonne B de chaque accessoire donne des longueurs correspondant à des valeurs d'« incertitude supplémentaire de 0,5 % ».
e La longueur droite de la colonne A donne une incertitude supplémentaire nulle ; aucune donnée n'est disponible pour les longueurs droites inférieures pouvant être utilisées pour obtenir la longueur droite de la colonne B.

Tableau 4.7 – Longueurs droites en amont du tube de Venturi

Valeurs exprimées en multiples du diamètre intérieur, *D*

Rapport des diamètres β	Coude simple à 90° [a]		Deux coudes ou plus à 90° dans le même plan ou dans des plans différents		Réduction de *1,33D* à *D* sur une longueur de 2,3*D*		Évasement de 0,67*D* à *D* sur une longueur de 2,5*D*		Réduction de *3D* à *D* sur une longueur de 3,5*D*		Évasement de 0,75*D* à *D* sur une longueur de *D*		Robinet sphérique ou robinet à opercule grand ouvert	
1	2		3		4		5		6		7		8	
–	A[b]	B[c]	A[b]	B[c]	A[b]	B[c]	A[b]	B[c]	A[b]	B[c]	A[b]	B[c]	A[b]	B[c]
0,30	8	3	8	3	4	c	4	d	2,5	d	2,5	d	2,5	d
0,40	8	3	8	3	4	d	4	d	2,5	d	2,5	d	2,5	d
0,50	9	3	10	3	4	d	5	4	5,5	2,5	2,5	d	3,5	2,5
0,60	10	3	10	3	4	d	6	4	8,5	2,5	3,5	2,5	4,5	2,5
0,70	14	3	19	3	4	d	7	5	10,5	2,5	5,5	3,5	5,5	3,5
0,75	16	8	22	8	4	d	7	6	11,5	3,5	6,5	4,5	5,5	3,5

Les longueurs droites minimales nécessaires sont des longueurs entre divers accessoires situés en amont du tube de Venturi classique et le tube de Venturi classique lui-même. Les longueurs droites doivent être mesurées à partir de l'extrémité aval de la partie incurvée du coude le plus proche (ou du seul coude) ou de l'extrémité aval de la partie incurvée ou conique de la réduction ou de l'évasement vers le plan de la prise de pression amont du tube de Venturi classique.

■ **Principe de mesurage avec un débitmètre à V-cône**

De part sa constitution, le débitmètre à V-cône peut mesurer un débit dans des conditions turbulentes. Il n'est quasiment pas nécessaire de prévoir de longueurs droites en amont ni en aval (3D en amont et 1D en aval).

La perte de charge résiduelle d'un V-cône est inférieure à celle d'un diaphragme (à β identique).

La forme du cône ne nécessite pas de remplacement car son usure est quasi inexistante, ce qui évite tout ré-étalonnage.

La précision que l'on peut attendre est inférieur à ± 1 % de la grandeur mesurée d'après le constructeur.

■ **Principe de mesurage avec un débitmètre à coin**

L'avantage de ce débitmètre est qu'il peut avoir un fonctionnement bidirectionnel. Par contre, il faut absolument respecter une horizontalité parfaite.

Il est adapté aux fluides chargés et aux fluides visqueux (mesure faisable avec *Re* de 500).

La précision que l'on peut attendre est inférieur à ± 1 % de la grandeur mesurée avec calibration d'après le constructeur, et de ± 3 % en absence de calibration.

5 • ANNEXES

5.1 Détail de fonctionnement du débitmètre de Coriolis

Nous avons brièvement exposé dans le chapitre 4.1 les lois mécaniques qui expliquent le fonctionnement du débitmètre en U à effet Coriolis. En voici le détail :

L'équation générale exprimant la force de Coriolis peut s'écrire :

$$\overrightarrow{F_C} = 2 \,.\, m \,.\, \overrightarrow{v_r} \,.\, \overrightarrow{\Omega}$$

avec :

$\overrightarrow{F_C}$ = force de Coriolis.

m = masse déplacée, en kg.

$\overrightarrow{v_r}$ = vitesse radiale dans un système en oscillation.

$\overrightarrow{\Omega}$ = vitesse angulaire.

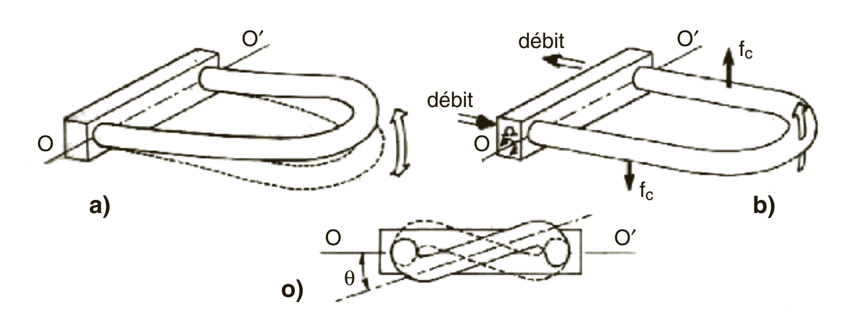


Figure 5.1 – Principe d'oscillation et de déformation du tube en U (doc. Dunod)

La force de Coriolis qui s'exerce sur une branche du U s'exprime par :

$$\overrightarrow{F_C} = 2 \,.\, \rho \,.\, S \,.\, L \,.\, \overrightarrow{\Omega} \,.\, \overrightarrow{v_r}$$

La masse m contenue dans le U se calcule de la façon suivante :

$$m = \rho \,.\, S \,.\, L$$

avec :

m = masse du fluide circulant, en kg.

ρ = masse volumique du fluide, en kg/m^3.

S = section du tube, en m^2.

L = longueur développée du U, en m.

Le débit massique Q_m se calcule donc par :

$$Q_m = \rho \cdot S \cdot \overrightarrow{v_r}$$

avec :
ρ = masse volumique du fluide, en kg/m^3.
S = section du tube, en m^2.
$\overrightarrow{v_r}$ = vitesse radiale dans un système en oscillation.

D'où l'expression de la force de Coriolis :

$$\overrightarrow{F_C} = 2 \cdot Q_m \cdot L \cdot \Omega$$

Le capteur mesure le déplacement d au niveau du coude. Sous l'effet de couple Γ_c qu'exercent les forces de Coriolis sur le U, il se produit un mouvement de torsion d'angle θ qui dépend du couple de rappel élastique Γ_e.
Couple exercé par les forces de Coriolis :

$$\Gamma_c = 2 \cdot Q_m \cdot \Omega \cdot L \cdot d$$

avec :
d = déplacement alternatif du coude.
Γ_c dépend de la vitesse radiale de circulation v_r et $-v_r$.
Couple de rappel élastique :

$$\Gamma_e = k \cdot \theta$$

avec:
k = coefficient d'élasticité du matériau.
θ = angle de torsion du U par rapport à l'horizontale.

À l'équilibre, on a :

$$\theta = \frac{2.Q_m.\Omega.L.d}{k}$$

$$\Leftrightarrow Q_m = \frac{k.\theta}{2.\Omega.L.d}$$

On note que θ et Ω sont fonction du temps. La mesure de l'angle θ par des capteurs permet de déterminer une tension proportionnelle au débit massique Q_m.

5.2 Détail de fonctionnement du débitmètre à effet Doppler

Comme il a été décrit précédemment au chapitre 4.4, le fonctionnement du débitmètre à effet Doppler est basé sur la réflexion des ondes acoustiques sur les particules, ou les bulles de gaz, présentes au sein du fluide en mouvement.
L'émetteur S émet un faisceau d'ultrasons dont la direction forme un angle θ avec le vecteur vitesse V. Une particule P présente dans fluide en mouvement réfléchi une partie du faisceau vers le récepteur R.

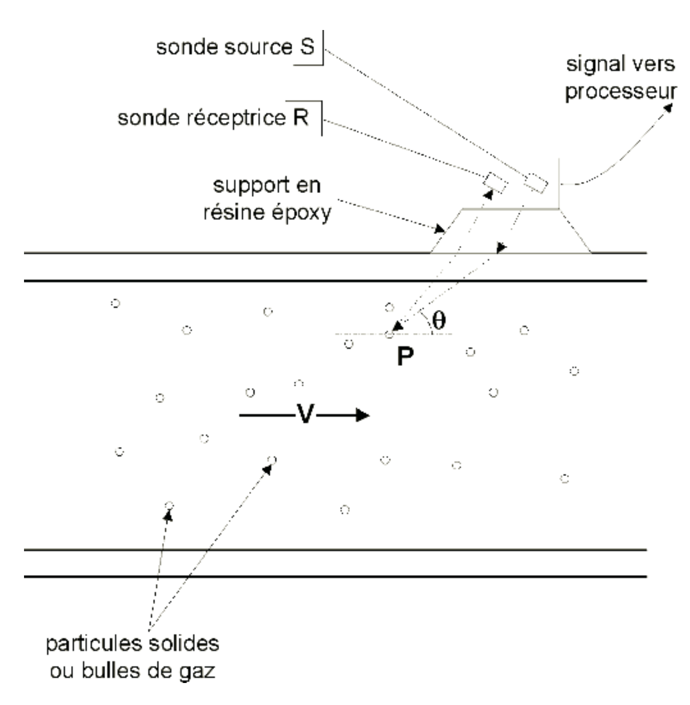


Figure 5.2 – Schéma de fonctionnement du débitmètre à effet Doppler

Si on considère la position de la particule *P* comme récepteur dans un référentiel $\mathfrak{R}$, celle-ci est alors immobile ($V_R = 0$).
La source *S* émet son faisceau vers *P* à la vitesse V_S égale à $V.cos\theta$.
Pour le récepteur *R*, la fréquence de réception est :

$$F_R = \frac{C - V_R}{C - V_S} . F_S$$

Dans le cas particulier où le récepteur est immobile ($V_R = 0$) pendant que la source se rapproche de lui ($Vs > 0$), on peut écrire :

$$F_R = \frac{C}{C - V_S} . F_S \text{ avec } F_R > F_S$$

On peut en déduire que la fréquence F_P reçue par la particule *P* peut alors s'écrire :

En considérant $\frac{V\cos\theta}{C}$ << 1, on peut écrire :

$$F_P = \frac{C}{C - V\cos\theta} . F_S \cong F_S\left(1 + \frac{V\cos\theta}{C}\right)$$

Dans le référentiel $\mathfrak{R}$, la particule *P* immobile réfléchit le signal de fréquence F_P et joue le rôle de source (donc $V_P = Vs = 0$) vers le récepteur *R*.
La vitesse du récepteur est alors : $V_R = - V . \cos\theta$.

La fréquence F_R reçue par le récepteur R est alors :

$$F_R = \frac{C + V\cos\theta}{C}.F_P = \left(1 + \frac{V\cos\theta}{C}\right)F_P$$

On en déduit alors :

$$F_R = \left(1 + \frac{V\cos\theta}{C}\right)^2 F_S \cong \left(1 + \frac{2.V\cos\theta}{C}\right)F_S$$

En développant le second terme de l'équation, on obtient :

$$\frac{F_R - F_S}{F_S} = \frac{\Delta F}{F_S} = \frac{2.V\cos\theta}{C}$$

5.3 Calcul du coefficient de décharge C d'un diaphragme

Le coefficient de décharge C est déterminé initialement pour un fluide incompressible et permet de relier le débit réel traversant le diaphragme à un débit théorique. Il est peut-être calculé selon deux équations :

5.3.1 Équation de Reader-Harris/Gallagher

$$C = 0{,}596\,1 - 0{,}216\beta^8 + 0{,}000\,521\left(\frac{10^6\beta}{Re_D}\right)^{0,7} + (0{,}018\,8 + 0{,}006\,3\,\text{A})\beta^{3,5}\left(\frac{10^6}{Re_D}\right)^{0,3}$$

$$+ (0{,}043 + 0{,}080e^{-10L_1} - 0{,}123e^{-7L_1})(1 - 0{,}11A)\frac{\beta^4}{1-\beta^4} - 0{,}031(M'_2 - 0{,}8M'^{1,1}_2)\beta^{1,3}$$

Si D < 71.12 mm, le terme $+0{,}011(0{,}75 - \beta)\left(2{,}8 - \frac{D}{25{,}4}\right)$ doit être ajouté à l'équation précédente.

Avec :

$\beta = \frac{d}{D}$ = rapport des diamètres exprimés en mm.

Re_D : nombre de Reynolds rapporté à D.

$L_1 = \frac{l_1}{D}$ = est le quotient de l'éloignement de la prise de pression amont, à partir de la face amont du diaphragme et du diamètre de la conduite.

$L'_2 = \frac{l'_2}{D}$ = est le quotient de l'éloignement de la prise de pression aval, à partir de la face aval du diaphragme et du diamètre de la conduite (L'_2 se rapporte à l'éloignement aval à partir de la face aval alors que L_2 se rapporte à l'éloignement aval de la face amont).

$$M'_2 = \frac{2L'_2}{1-\beta}$$

$$A = \left(\frac{19\,000\beta}{Re_D}\right)^{0,8}$$

Pour les prises dans les angles :

$$L_1 = L_2' = 0$$

Pour les prises à D et à $D/2$:

$$L_1 = 1$$

$$L_2' = 0,47$$

Pour les prises à la bride :

$$L_1 = L_2' = \frac{25,4}{D} \text{ où } D \text{ est exprimé en mm.}$$

5.3.2 Équation de Stolz

$$C = 0,5959 + 0,0312\,\beta^{2,1} - 0,1840\,\beta^8 + 0,0029\,\beta^{2,1}\left(\frac{10^6}{\mathrm{Re}_D}\right)^{0,75} + 0,09\,L_1\frac{\beta^4}{1-\beta^4} - 0,0337\,L_2'\,\beta^3$$

avec :

Re_D : nombre de Reynolds rapporté à D.

$L_1 = \frac{l_1}{D}$: est le quotient de l'éloignement de la prise de pression amont, à partir de la face amont du diaphragme et du diamètre de la conduite.

$L_2' = \frac{l_2'}{D}$: est le quotient de l'éloignement de la prise de pression aval, à partir de la face aval du diaphragme et du diamètre de la conduite (L_2' se rapporte à l'éloignement aval à partir de la face aval alors que L_2 se rapporte à l'éloignement aval de la face amont).

On note que si $L_1 \geq \frac{0.039}{0.09} (= 0,433\,3)$ alors on prend $\frac{\beta^4}{1-\beta^4} = 0,039$

Pour les prises dans les angles :

$$L_1 = L_2' = 0$$

Pour les prises à D et à $D/2$:

$$L_1 = 1$$

$$L_2' = 0,47$$

Pour les brides à la bride :

$$L_1 = L_2' = \frac{25,4}{D} \text{ où } D \text{ est exprimé en mm.}$$

5.4 Coefficients de décharge C d'un diaphragme

Tableau 5.1 – Coefficient de décharge *C* du diaphragme à prises de pression à la bride et *D* = 50 mm (doc. AFNOR)

Rapport des diamètres	Coefficient de décharge, *C*, pour Re_D égal à										
β	5×10^3	1×10^4	2×10^4	3×10^4	5×10^4	7×10^4	1×10^5	3×10^5	1×10^6	1×10^7	1×10^8	∞
0,25	0,610 2	0,606 9	0,604 8	0,604 0	0,603 2	0,602 9	0,602 5	0,601 9	0,601 6	0,601 4	0,601 3	0,601 2
0,26	0,610 6	0,607 1	0,605 0	0,604 1	0,603 3	0,602 9	0,602 6	0,602 0	0,601 6	0,601 4	0,601 3	0,601 2
0,28	0,611 4	0,607 6	0,605 3	0,604 4	0,603 5	0,603 1	0,602 8	0,602 1	0,601 7	0,601 4	0,601 3	0,601 2
0,30	0,612 3	0,608 2	0,605 7	0,604 7	0,603 8	0,603 4	0,603 0	0,602 2	0,601 8	0,601 5	0,601 4	0,601 3
0,32	0,613 2	0,608 9	0,606 2	0,605 2	0,604 2	0,603 7	0,603 2	0,602 4	0,601 9	0,601 6	0,601 4	0,601 3
0,34	0,614 3	0,609 7	0,606 8	0,605 6	0,604 5	0,604 0	0,603 5	0,602 6	0,602 1	0,601 7	0,601 6	0,601 4
0,36	0,615 5	0,610 5	0,607 4	0,606 2	0,605 0	0,604 4	0,603 9	0,602 9	0,602 3	0,601 9	0,601 7	0,601 6
0,38	0,616 9	0,611 5	0,608 1	0,606 8	0,605 5	0,604 9	0,604 3	0,603 2	0,602 6	0,602 1	0,601 9	0,601 7
0,40	0,618 4	0,612 5	0,608 9	0,607 5	0,606 1	0,605 4	0,604 8	0,603 6	0,602 9	0,602 3	0,602 1	0,601 9
0,42	0,620 0	0,613 7	0,609 8	0,608 2	0,606 8	0,606 0	0,605 4	0,604 1	0,603 3	0,602 6	0,602 3	0,602 1
0,44	0,621 9	0,615 0	0,610 8	0,609 1	0,607 5	0,606 7	0,606 0	0,604 5	0,603 7	0,602 9	0,602 6	0,602 3
0,46	0,623 9	0,616 4	0,611 9	0,610 0	0,608 3	0,607 4	0,606 7	0,605 1	0,604 1	0,603 3	0,602 9	0,602 6
0,48	0,626 0	0,618 0	0,613 0	0,611 0	0,609 2	0,608 4	0,607 4	0,605 7	0,604 6	0,603 6	0,603 2	0,602 8
0,50	0,628 4	0,619 6	0,614 3	0,612 1	0,610 1	0,609 1	0,608 2	0,606 3	0,605 1	0,604 0	0,603 6	0,603 1
0,51	0,629 7	0,620 5	0,614 9	0,612 7	0,610 6	0,609 5	0,608 6	0,606 6	0,605 4	0,604 2	0,603 7	0,603 3
0,52	0,631 0	0,621 4	0,615 6	0,613 3	0,611 1	0,610 0	0,609 0	0,606 9	0,605 6	0,604 4	0,603 9	0,603 4
0,53	0,632 4	0,622 4	0,616 3	0,613 9	0,611 6	0,610 5	0,609 4	0,607 3	0,605 9	0,604 6	0,604 1	0,603 5
0,54	0,633 8	0,623 4	0,617 1	0,614 5	0,612 2	0,610 9	0,609 9	0,607 6	0,606 2	0,604 8	0,604 2	0,603 7
0,55	0,635 2	0,624 4	0,617 8	0,615 2	0,612 7	0,611 4	0,610 3	0,608 0	0,606 5	0,605 0	0,604 4	0,603 8
0,56	0,636 7	0,625 4	0,618 6	0,615 9	0,613 3	0,611 9	0,610 8	0,608 3	0,606 7	0,605 2	0,604 5	0,603 9
0,57	0,638 3	0,626 5	0,619 4	0,616 5	0,613 8	0,612 4	0,611 2	0,608 7	0,607 0	0,605 4	0,604 7	0,604 0
0,58	0,639 9	0,627 6	0,620 2	0,617 2	0,614 4	0,613 0	0,611 7	0,609 0	0,607 3	0,605 6	0,604 8	0,604 1
0,59	0,641 6	0,628 7	0,621 0	0,617 9	0,615 0	0,613 5	0,612 2	0,609 3	0,607 5	0,605 8	0,605 0	0,604 2
0,60	0,643 3	0,629 9	0,621 8	0,618 6	0,615 5	0,614 0	0,612 6	0,609 7	0,607 8	0,605 9	0,605 1	0,604 3
0,61	0,645 0	0,631 0	0,622 7	0,619 3	0,616 1	0,614 5	0,613 1	0,610 0	0,608 0	0,606 0	0,605 1	0,604 3
0,62	0,646 8	0,632 2	0,623 5	0,620 0	0,616 7	0,615 0	0,613 5	0,610 3	0,608 2	0,606 2	0,605 2	0,604 3
0,63	0,648 6	0,633 4	0,624 3	0,620 7	0,617 3	0,615 5	0,613 9	0,610 6	0,608 4	0,606 2	0,605 3	0,604 3
0,64	0,650 5	0,634 7	0,625 2	0,621 4	0,617 8	0,616 0	0,614 4	0,610 9	0,608 6	0,606 3	0,605 3	0,604 3
0,65	0,652 4	0,635 9	0,626 0	0,622 1	0,618 4	0,616 4	0,614 8	0,611 1	0,608 8	0,606 4	0,605 3	0,604 2
0,66	0,654 4	0,637 1	0,626 9	0,622 8	0,618 9	0,616 9	0,615 2	0,611 4	0,608 9	0,606 4	0,605 2	0,604 1
0,67	0,656 4	0,638 4	0,627 7	0,623 4	0,619 4	0,617 3	0,615 5	0,611 6	0,609 0	0,606 3	0,605 1	0,603 9
0,68	0,658 4	0,639 6	0,628 5	0,624 1	0,619 9	0,617 7	0,615 8	0,611 7	0,609 0	0,606 2	0,605 0	0,603 7
0,69	0,660 4	0,640 9	0,629 3	0,624 7	0,620 4	0,618 1	0,616 1	0,611 9	0,609 0	0,606 1	0,604 8	0,603 5
0,70	0,662 5	0,642 1	0,630 1	0,625 3	0,620 8	0,618 5	0,616 4	0,612 0	0,609 0	0,606 0	0,604 5	0,603 2
0,71	0,664 6	0,643 4	0,630 9	0,625 9	0,621 2	0,618 8	0,616 6	0,612 0	0,608 9	0,605 7	0,604 3	0,602 8
0,72	0,666 7	0,644 6	0,631 8	0,626 5	0,621 6	0,619 0	0,616 8	0,612 0	0,608 8	0,605 5	0,603 9	0,602 4
0,73	0,668 9	0,645 9	0,632 3	0,627 0	0,621 9	0,619 3	0,617 0	0,612 0	0,608 6	0,605 1	0,603 5	0,601 9
0,74	0,671 0	0,647 1	0,633 0	0,627 5	0,622 2	0,619 5	0,617 1	0,611 9	0,608 4	0,604 7	0,603 0	0,601 4
0,75	0,673 2	0,648 3	0,633 7	0,627 9	0,622 4	0,619 6	0,617 1	0,611 7	0,608 1	0,604 3	0,602 5	0,600 8

Note : ce tableau est donné à titre indicatif. Il n'est pas prévu pour une interpolation précise. L'extrapolation n'est pas permise.

Tableau 5.2 – Coefficient de décharge *C* du diaphragme à prises de pression dans les angles et pour $D \geq 71{,}12$ mm (doc. AFNOR)

Rapport des diamètres	Coefficient de décharge, *C*, pour Re_D égal à											
β	5×10^3	1×10^4	2×10^4	3×10^4	5×10^4	7×10^4	1×10^5	3×10^5	1×10^6	1×10^7	1×10^8	∞
0,10	0,600 6	0,599 0	0,598 0	0,597 6	0,597 2	0,597 0	0,596 9	0,596 6	0,596 5	0,596 4	0,596 4	0,596 4
0,12	0,601 4	0,599 5	0,598 3	0,597 9	0,597 5	0,597 3	0,597 1	0,596 8	0,596 6	0,596 5	0,596 5	0,596 5
0,14	0,602 1	0,600 0	0,598 7	0,598 2	0,597 7	0,597 5	0,597 3	0,596 9	0,596 8	0,596 6	0,596 6	0,596 6
0,16	0,602 8	0,600 5	0,599 1	0,598 5	0,598 0	0,597 8	0,597 6	0,597 1	0,596 9	0,596 8	0,596 8	0,596 8
0,18	0,603 6	0,601 1	0,599 5	0,598 9	0,598 3	0,598 1	0,597 8	0,597 4	0,597 1	0,597 0	0,597 0	0,596 9
0,20	0,604 5	0,601 7	0,600 0	0,599 3	0,598 7	0,598 4	0,598 1	0,597 6	0,597 4	0,597 2	0,597 2	0,597 1
0,22	0,605 3	0,602 3	0,600 5	0,599 8	0,599 1	0,598 7	0,598 5	0,597 9	0,597 6	0,597 4	0,597 4	0,597 4
0,24	0,606 2	0,603 0	0,601 0	0,600 2	0,599 5	0,599 1	0,598 8	0,598 2	0,597 9	0,597 7	0,597 6	0,597 6
0,26	0,607 2	0,603 8	0,601 6	0,600 7	0,599 9	0,599 6	0,599 2	0,598 6	0,598 2	0,598 0	0,597 9	0,597 9
0,28	0,608 3	0,604 6	0,602 2	0,601 3	0,600 4	0,600 0	0,599 7	0,599 0	0,598 6	0,598 3	0,598 2	0,598 1
0,30	0,609 5	0,605 4	0,602 9	0,601 9	0,601 0	0,600 5	0,600 1	0,599 4	0,598 9	0,598 6	0,598 5	0,598 4
0,32	0,610 7	0,606 3	0,603 6	0,602 6	0,601 6	0,601 1	0,600 6	0,599 8	0,599 3	0,599 0	0,598 8	0,598 7
0,34	0,612 0	0,607 3	0,604 4	0,603 3	0,602 2	0,601 7	0,601 2	0,600 3	0,599 8	0,599 3	0,599 2	0,599 1
0,36	0,613 5	0,608 4	0,605 3	0,604 0	0,602 9	0,602 3	0,601 8	0,600 8	0,600 2	0,599 7	0,599 6	0,599 4
0,38	0,615 1	0,609 6	0,606 2	0,604 9	0,603 6	0,603 0	0,602 4	0,601 3	0,600 7	0,600 1	0,599 9	0,599 8
0,40	0,616 8	0,610 9	0,607 2	0,605 8	0,604 4	0,603 7	0,603 1	0,601 9	0,601 2	0,600 6	0,600 3	0,600 1
0,42	0,618 7	0,612 2	0,608 3	0,606 7	0,605 2	0,604 4	0,603 8	0,602 5	0,601 7	0,601 0	0,600 7	0,600 5
0,44	0,620 7	0,613 7	0,609 4	0,607 7	0,606 1	0,605 2	0,604 5	0,603 1	0,602 2	0,601 4	0,601 1	0,600 8
0,46	0,622 8	0,615 2	0,610 6	0,608 7	0,607 0	0,606 1	0,605 3	0,603 7	0,602 7	0,601 9	0,601 5	0,601 2
0,48	0,625 1	0,616 9	0,611 8	0,609 8	0,607 9	0,606 9	0,606 1	0,604 3	0,603 3	0,602 3	0,601 9	0,601 5
0,50	0,627 6	0,618 6	0,613 1	0,610 9	0,608 8	0,607 8	0,606 9	0,605 0	0,603 8	0,602 7	0,602 2	0,601 8
0,51	0,628 9	0,619 5	0,613 8	0,611 5	0,609 3	0,608 2	0,607 3	0,605 3	0,604 0	0,602 9	0,602 4	0,601 9
0,52	0,630 2	0,620 4	0,614 4	0,612 1	0,609 8	0,608 7	0,607 7	0,605 6	0,604 3	0,603 0	0,602 5	0,602 0
0,53	0,631 6	0,621 3	0,615 1	0,612 6	0,610 3	0,609 1	0,608 0	0,605 9	0,604 5	0,603 2	0,602 6	0,602 1
0,54	0,633 0	0,622 3	0,615 8	0,613 2	0,610 8	0,609 5	0,608 4	0,606 1	0,604 7	0,603 3	0,602 7	0,602 1
0,55	0,634 4	0,623 2	0,616 5	0,613 8	0,611 2	0,609 9	0,608 8	0,606 4	0,604 9	0,603 4	0,602 8	0,602 2
0,56	–	0,624 2	0,617 2	0,614 3	0,611 7	0,610 3	0,609 1	0,606 5	0,605 0	0,603 5	0,602 8	0,602 2
0,57	–	0,625 2	0,617 9	0,614 9	0,612 1	0,610 7	0,609 5	0,606 9	0,605 2	0,603 6	0,602 8	0,602 2
0,58	–	0,626 2	0,618 5	0,615 5	0,612 6	0,611 1	0,609 8	0,607 0	0,605 3	0,603 6	0,602 8	0,602 1
0,59	–	0,627 2	0,619 2	0,616 0	0,613 0	0,611 4	0,610 1	0,607 2	0,605 4	0,603 6	0,602 8	0,602 0
0,60	–	0,628 2	0,618 9	0,616 5	0,613 4	0,611 7	0,610 3	0,607 3	0,605 4	0,603 5	0,602 7	0,601 9
0,61	–	0,629 2	0,620 5	0,617 0	0,613 7	0,612 0	0,610 6	0,607 4	0,605 4	0,603 4	0,602 5	0,601 7
0,62	–	0,630 2	0,621 1	0,617 5	0,614 0	0,612 3	0,610 8	0,607 5	0,605 4	0,603 3	0,602 3	0,601 4
0,63	–	0,631 2	0,621 7	0,617 9	0,614 3	0,612 5	0,610 9	0,607 5	0,605 2	0,603 0	0,602 1	0,601 1
0,64	–	0,632 1	0,622 2	0,618 3	0,614 5	0,612 6	0,611 0	0,607 4	0,605 1	0,602 8	0,601 7	0,600 7
0,65	–	0,633 1	0,622 7	0,618 6	0,614 7	0,612 7	0,611 0	0,607 3	0,604 8	0,602 4	0,601 3	0,600 2
0,66	–	0,634 0	0,623 2	0,618 9	0,614 8	0,612 8	0,611 0	0,607 1	0,604 5	0,602 0	0,600 8	0,599 7
0,67	–	0,634 8	0,623 6	0,619 1	0,614 9	0,612 7	0,610 8	0,606 8	0,604 1	0,601 4	0,600 2	0,599 0
0,68	–	0,635 7	0,623 9	0,619 3	0,614 9	0,612 6	0,610 6	0,606 4	0,603 6	0,600 8	0,599 5	0,598 3
0,69	–	0,636 4	0,624 2	0,619 3	0,614 7	0,612 4	0,610 4	0,605 9	0,603 0	0,600 1	0,598 7	0,597 4
0,70	–	0,637 2	0,624 4	0,619 3	0,614 5	0,612 1	0,610 0	0,605 3	0,602 3	0,599 2	0,597 8	0,596 4
0,71	–	0,637 8	0,624 5	0,619 2	0,614 2	0,611 7	0,609 4	0,604 6	0,601 4	0,598 2	0,596 7	0,595 3
0,72	–	0,638 3	0,624 4	0,618 9	0,613 8	0,611 1	0,608 8	0,603 8	0,600 5	0,597 1	0,595 5	0,594 0
0,73	–	0,638 8	0,624 3	0,618 6	0,613 2	0,610 4	0,608 0	0,602 8	0,599 3	0,595 8	0,594 2	0,592 6
0,74	–	0,639 1	0,624 0	0,618 1	0,612 5	0,609 6	0,607 1	0,601 6	0,598 0	0,594 3	0,592 6	0,591 0
0,75	–	0639 4	0,623 6	0,617 4	0,611 6	0,608 6	0,606 0	0,600 3	0,596 5	0,592 7	0,590 9	0,589 2

Note : ce tableau est donné à titre indicatif. Il n'est pas prévu pour une interpolation précise. L'extrapolation n'est pas permise.

Tableau 5.3 – Coefficient de décharge C du diaphragme à prises de pression à D et D/2, et pour $D \geq 71{,}12$ mm (doc. AFNOR)

Rapport des diamètres		Coefficient de décharge, C, pour Re_D égal à										
β	5×10^3	1×10^4	2×10^4	3×10^4	5×10^4	7×10^4	1×10^5	3×10^5	1×10^6	1×10^7	1×10^8	∞
0,10	0,600 3	0,598 7	0,597 7	0,597 3	0,596 9	0,596 7	0,596 6	0,596 3	0,596 2	0,596 1	0,596 1	0,596 0
0,12	0,601 0	0,599 1	0,597 9	0,597 5	0,597 1	0,596 9	0,596 7	0,596 4	0,596 2	0,596 1	0,596 1	0,596 1
0,14	0,601 6	0,599 5	0,598 2	0,597 7	0,597 2	0,597 0	0,596 8	0,596 5	0,596 3	0,596 2	0,596 1	0,596 1
0,16	0,602 3	0,600 0	0,598 5	0,598 0	0,597 4	0,597 2	0,597 0	0,596 6	0,596 4	0,596 2	0,596 2	0,596 2
0,18	0,602 9	0,600 4	0,598 9	0,598 2	0,597 7	0,597 4	0,597 1	0,596 7	0,596 5	0,596 3	0,596 3	0,596 3
0,20	0,603 7	0,600 9	0,599 2	0,598 5	0,597 9	0,597 6	0,597 4	0,596 9	0,596 6	0,596 4	0,596 4	0,596 4
0,22	0,604 4	0,601 5	0,599 6	0,598 9	0,598 2	0,597 9	0,597 6	0,597 1	0,596 8	0,596 6	0,596 5	0,596 5
0,24	0,605 3	0,602 1	0,600 1	0,599 3	0,598 5	0,598 2	0,597 9	0,597 3	0,597 0	0,596 7	0,596 7	0,596 6
0,26	0,606 2	0,602 7	0,600 6	0,599 7	0,598 9	0,598 5	0,598 2	0,597 5	0,597 2	0,596 9	0,596 9	0,596 8
0,28	0,607 2	0,603 4	0,601 1	0,600 2	0,599 3	0,598 9	0,598 5	0,597 8	0,597 5	0,597 2	0,597 1	0,597 0
0,30	0,608 2	0,604 2	0,601 7	0,600 7	0,599 8	0,599 3	0,598 9	0,598 2	0,597 8	0,597 4	0,597 3	0,597 3
0,32	0,609 4	0,605 1	0,602 4	0,601 3	0,600 3	0,599 8	0,599 4	0,598 6	0,598 1	0,597 7	0,597 6	0,597 5
0,34	0,610 7	0,606 0	0,603 1	0,602 0	0,600 9	0,600 4	0,599 9	0,599 0	0,598 5	0,598 1	0,597 9	0,597 8
0,36	0,612 1	0,607 1	0,604 0	0,602 7	0,601 6	0,601 0	0,600 5	0,599 5	0,598 9	0,598 4	0,598 3	0,598 1
0,38	0,613 7	0,608 2	0,604 9	0,603 5	0,602 3	0,601 6	0,601 1	0,600 0	0,599 4	0,598 8	0,598 6	0,598 5
0,40	0,615 3	0,609 5	0,605 9	0,604 4	0,603 1	0,602 4	0,601 8	0,600 6	0,599 9	0,599 3	0,599 1	0,598 9
0,42	0,617 2	0,610 9	0,607 0	0,605 4	0,603 9	0,603 2	0,602 5	0,601 2	0,600 5	0,599 8	0,599 5	0,599 3
0,44	0,619 2	0,612 4	0,608 2	0,606 5	0,604 9	0,604 1	0,603 4	0,601 9	0,601 1	0,600 3	0,600 0	0,599 7
0,46	0,621 4	0,614 0	0,609 4	0,607 6	0,605 9	0,605 0	0,604 2	0,602 7	0,601 7	0,600 8	0,600 5	0,600 2
0,48	0,623 8	0,615 7	0,610 8	0,608 8	0,607 0	0,606 0	0,605 2	0,603 5	0,602 4	0,601 4	0,601 0	0,600 6
0,50	0,626 4	0,617 6	0,612 3	0,610 1	0,608 1	0,607 1	0,606 2	0,604 3	0,603 1	0,602 0	0,601 6	0,601 1
0,51	0,627 8	0,618 6	0,613 1	0,610 8	0,608 7	0,607 6	0,606 7	0,604 7	0,603 5	0,602 3	0,601 9	0,601 4
0,52	0,629 2	0,619 7	0,613 9	0,611 5	0,609 3	0,608 2	0,607 2	0,605 2	0,603 9	0,602 7	0,602 1	0,601 6
0,53	0,630 7	0,620 7	0,614 7	0,612 3	0,610 0	0,608 8	0,607 8	0,605 6	0,604 3	0,603 0	0,602 4	0,601 9
0,54	0,632 2	0,621 8	0,615 5	0,613 0	0,610 6	0,609 4	0,608 3	0,606 1	0,604 7	0,603 3	0,602 7	0,602 1
0,55	0,633 7	0,622 9	0,616 4	0,613 8	0,611 3	0,610 0	0,608 9	0,606 5	0,605 0	0,603 6	0,603 0	0,602 4
0,56	–	0,624 1	0,617 3	0,614 5	0,611 9	0,610 6	0,609 5	0,607 0	0,605 4	0,603 9	0,603 2	0,602 6
0,57	–	0,625 3	0,618 2	0,615 3	0,612 6	0,611 2	0,610 0	0,607 5	0,605 8	0,604 2	0,603 5	0,602 8
0,58	–	0,626 5	0,619 1	0,616 1	0,613 3	0,611 9	0,610 6	0,607 9	0,606 2	0,604 5	0,603 8	0,603 0
0,59	–	0,627 7	0,620 0	0,616 9	0,614 0	0,612 5	0,611 2	0,608 4	0,606 6	0,604 8	0,604 0	0,603 2
0,60	–	0,629 0	0,621 0	0,617 7	0,614 7	0,613 1	0,611 8	0,608 8	0,607 0	0,605 1	0,604 2	0,603 4
0,61	–	0,630 3	0,621 9	0,618 6	0,615 4	0,613 8	0,612 4	0,609 3	0,607 3	0,605 3	0,604 4	0,603 6
0,62	–	0,631 6	0,622 9	0,619 4	0,616 1	0,614 4	0,612 9	0,609 7	0,607 7	0,605 6	0,604 6	0,603 7
0,63	–	0,632 9	0,623 8	0,620 2	0,616 8	0,615 0	0,613 5	0,610 2	0,608 0	0,605 8	0,604 8	0,603 9
0,64	–	0,634 3	0,624 8	0,621 0	0,617 5	0,615 6	0,614 0	0,610 6	0,608 3	0,606 0	0,605 0	0,603 9
0,65	–	0,635 6	0,625 8	0,621 9	0,618 2	0,616 2	0,614 6	0,610 9	0,608 6	0,606 2	0,605 1	0,604 0
0,66	–	0,637 0	0,626 8	0,622 7	0,618 8	0,616 8	0,615 1	0,611 3	0,608 8	0,606 3	0,605 1	0,604 0
0,67	–	0,638 4	0,627 7	0,623 5	0,619 5	0,617 4	0,615 6	0,611 6	0,609 0	0,606 4	0,605 2	0,604 0
0,68	–	0,639 8	0,628 7	0,624 3	0,620 1	0,617 9	0,616 1	0,612 0	0,609 2	0,606 5	0,605 2	0,603 9
0,69	–	0,641 1	0,629 6	0,625 0	0,620 7	0,618 5	0,616 5	0,612 2	0,609 4	0,606 5	0,605 1	0,603 8
0,70	–	0,642 5	0,630 5	0,625 8	0,621 3	0,618 9	0,616 9	0,612 5	0,609 5	0,606 5	0,605 1	0,603 7
0,71	–	0,643 9	0,631 5	0,626 5	0,621 8	0,619 4	0,617 3	0,612 7	0,609 6	0,606 4	0,604 9	0,603 5
0,72	–	0,645 3	0,632 3	0,627 2	0,622 3	0,619 8	0,617 6	0,612 8	0,609 6	0,606 3	0,604 7	0,603 2
0,73	–	0,646 7	0,633 2	0,627 9	0,622 8	0,620 2	0,617 9	0,612 9	0,609 6	0,606 1	0,604 5	0,602 9
0,74	–	0,648 0	0,634 0	0,628 5	0,623 3	0,620 6	0,618 2	0,613 0	0,609 5	0,605 9	0,604 2	0,602 5
0,75	–	0,649 4	0,634 9	0,629 1	0,6237	0,620 9	0,618 4	0,613 0	0,609 4	0,605 6	0,603 8	0,602 1

Note : ce tableau est donné à titre indicatif. Il n'est pas prévu pour une interpolation précise. L'extrapolation n'est pas permise.

5.5 Coefficients de décharge C d'une tuyère

Tableau 5.4 – Coefficient de décharge *C* de la tuyère ISA 1932 (doc. AFNOR)

Rapport des diamètres		**Coefficient de décharge, *C*, pour Re_D égal à**							
β	**2×10^4**	**3×10^4**	**5×10^4**	**7×10^4**	**1×10^5**	**3×10^5**	**1×10^6**	**2×10^6**	**1×10^7**
0,30	–	–	–	0,985 5	0,986 5	0,987 8	0,988 2	0,988 3	0,988 4
0,32	–	–	–	0,984 7	0,985 8	0,987 3	0,987 7	0,987 8	0,987 9
0,34	–	–	–	0,983 8	0,985 0	0,986 6	0,987 1	0,987 2	0,987 3
0,36	–	–	–	0,982 8	0,984 0	0,985 9	0,986 4	0,986 5	0,986 6
0,38	–	–	–	0,981 6	0,983 0	0,984 9	0,985 5	0,985 6	0,985 7
0,40	–	–	–	0,980 3	0,981 8	0,983 9	0,984 5	0,984 6	0,984 7
0,42	–	–	–	0,978 9	0,990 5	0,982 7	0,983 3	0,983 4	0,983 5
0,44	0,961 6	0,969 2	0,975 0	0,977 3	0,978 9	0,961 3	0,982 0	0,982 1	0,982 2
0,45	0,960 4	0,968 2	0,974 1	0,976 4	0,978 1	0,980 5	0,981 2	0,981 3	0,981 4
0,46	0,959 2	0,967 2	0,973 1	0,975 5	0,977 3	0,979 7	0,980 4	0,980 5	0,980 6
0,47	0,957 9	0,966 1	0,972 2	0,974 6	0,976 3	0,978 8	0,979 5	0,979 7	0,979 7
0,48	0,956 7	0,965 0	0,971 1	0,973 6	0,975 4	0,977 9	0,978 6	0,978 7	0,978 8
0,49	0,955 4	0,963 8	0,970 0	0,972 6	0,974 3	0,976 9	0,977 6	0,977 7	0,977 8
0,50	0,954 2	0,962 6	0,968 9	0,971 5	0,973 3	0,975 8	0,976 6	0,976 7	0,976 8
0,51	0,952 9	0,961 4	0,967 8	0,970 3	0,972 1	0,974 7	0,975 4	0,975 6	0,975 7
0,52	0,951 6	0,960 2	0,966 5	0,969 1	0,970 9	0,973 5	0,974 3	0,974 4	0,974 5
0,53	0,950 3	0,958 9	0,965 3	0,967 8	0,969 6	0,972 2	0,973 0	0,973 1	0,973 2
0,54	0,949 0	0,957 6	0,963 9	0,966 5	0,968 3	0,970 9	0,971 7	0,971 8	0,971 9
0,55	0,947 7	0,956 2	0,962 6	0,965 1	0,966 9	0,969 5	0,970 2	0,970 4	0,970 5
0,56	0,946 4	0,954 8	0,961 1	0,963 7	0,965 5	0,958 0	0,968 8	0,968 9	0,969 0
0,57	0,945 1	0,953 4	0,959 6	0,962 1	0,963 9	0,966 4	0,967 2	0,967 3	0,967 4
0,58	0,943 8	0,952 0	0,958 1	0,960 6	0,962 3	0,964 8	0,965 5	0,965 6	0,965 7
0,59	0,942 4	0,950 5	0,956 5	0,958 9	0,960 6	0,963 0	0,963 8	0,963 9	0,964 0
0,60	0,941 1	0,949 0	0,954 8	0,957 2	0,958 8	0,961 2	0,961 9	0,962 0	0,962 1
0,61	0,939 8	0,947 4	0,953 1	0,955 4	0,957 0	0,959 3	0,960 0	0,960 1	0,960 2
0,62	0,938 5	0,945 8	0,951 3	0,953 5	0,955 0	0,957 3	0,957 9	0,958 0	0,958 1
0,63	0,937 1	0,944 2	0,949 4	0,951 5	0,953 0	0,955 1	0,955 8	0,955 9	0,956 0
0,64	0,935 8	0,942 5	0,947 5	0,949 5	0,950 9	0,952 9	0,953 5	0,953 6	0,953 7
0,65	0,934 5	0,940 8	0,945 5	0,947 3	0,948 7	0,950 6	0,951 1	0,951 2	0,951 3
0,66	0,933 2	0,939 0	0,943 4	0,945 1	0,946 4	0,948 1	0,948 7	0,948 7	0,948 8
0,67	0,931 9	0,937 2	0,941 2	0,942 8	0,944 0	0,945 6	0,946 0	0,946 1	0,946 2
0,68	0,930 6	0,935 4	0,939 0	0,940 4	0,941 4	0,942 9	0,943 3	0,943 4	0,943 5
0,69	0,929 3	0,933 5	0,936 7	0,937 9	0,938 8	0,940 1	0,940 5	0,940 5	0,940 6
0,70	0,928 0	0,931 6	0,934 3	0,935 3	0,936 1	0,937 2	0,937 5	0,937 5	0,937 6
0,71	0,926 8	0,929 6	0,931 8	0,932 6	0,933 2	0,934 1	0,934 4	0,934 4	0,934 4
0,72	0,925 5	0,927 6	0,929 2	0,929 8	0,930 3	0,930 9	0,931 1	0,931 1	0,931 2
0,73	0,924 3	0,925 6	0,926 5	0,926 9	0,927 2	0,927 6	0,927 7	0,927 7	0,927 8
0,74	0,923 1	0,923 5	0,923 8	0,923 9	0,924 0	0,924 1	0,924 2	0,924 2	0,924 2
0,75	0,921 9	0,921 3	0,920 9	0,920 8	0,920 7	0,920 5	0,920 5	0,920 5	0,920 5
0,76	0,920 7	0,919 2	0,918 0	0,917 6	0,917 2	0,916 8	0,916 6	0,916 6	0,916 6
0,77	0,919 5	0,916 9	0,915 0	0,914 2	0,913 6	0,912 8	0,912 6	0,912 6	0,912 5
0,78	0,918 4	0,914 7	0,911 8	0,910 7	0,909 9	0,908 8	0,908 4	0,908 4	0,908 3
0,79	0,917 3	0,912 3	0,908 6	0,907 1	0,906 0	0,904 5	0,904 1	0,904 0	0,904 0
0,80	0,916 2	0,910 0	0,905 3	0,903 4	0,902 0	0,900 1	0,899 6	0,899 5	0,899 4

Note : ce tableau est donné à titre indicatif. Il n'est pas prévu pour une interpolation précise. L'extrapolation n'est pas permise.

Tableau 5.5 – Coefficient de décharge *C* de la tuyère à long rayon (doc. AFNOR)

Rapport des diamètres	**Coefficient de décharge, *C*, pour Re_D égal à**								
β	**1×10^4**	**2×10^4**	**5×10^4**	**1×10^5**	**2×10^5**	**5×10^5**	**1×10^6**	**5×10^6**	**1×10^7**
0,20	0,967 3	0,975 9	0,983 4	0,987 3	0,990 0	0,992 4	0,993 6	0,995 2	0,995 6
0,22	0,965 9	0,974 8	0,982 8	0,986 8	0,989 7	0,992 2	0,993 4	0,995 1	0,995 5
0,24	0,964 5	0,973 9	0,982 2	0,986 4	0,989 3	0,992 0	0,993 3	0,995 1	0,995 5
0,26	0,963 2	0,973 0	0,981 6	0,986 0	0,989 1	0,991 8	0,993 2	0,995 0	0,995 4
0,28	0,961 9	0,972 1	0,981 0	0,985 6	0,988 8	0,991 6	0,993 0	0,995 0	0,995 4
0,30	0,960 7	0,971 2	0,980 5	0,985 5	0,988 5	0,991 4	0,992 9	0,994 9	0,995 4
0,32	0,959 6	0,970 4	0,980 0	0,984 8	0,988 2	0,991 3	0,992 8	0,994 8	0,995 3
0,34	0,958 4	0,969 6	0,979 5	0,984 5	0,988 0	0,991 1	0,992 7	0,994 8	0,995 3
0,36	0,957 3	0,968 8	0,979 0	0,984 1	0,987 7	0,991 0	0,992 6	0,994 7	0,995 3
0,38	0,956 2	0,968 0	0,978 5	0,983 8	0,987 5	0,990 8	0,992 5	0,994 7	0,995 2
0,40	0,955 2	0,967 3	0,978 0	0,983 4	0,987 3	0,990 7	0,992 4	0,994 7	0,995 2
0,42	0,954 2	0,966 6	0,977 6	0,983 1	0,987 0	0,990 5	0,992 3	0,994 6	0,995 2
0,44	0,953 2	0,965 9	0,977 1	0,982 8	0,986 8	0,990 4	0,992 2	0,994 6	0,995 1
0,46	0,952 3	0,965 2	0,976 7	0,982 5	0,986 6	0,990 2	0,992 1	0,994 5	0,995 1
0,48	0,951 3	0,964 5	0,976 3	0,982 2	0,986 4	0,990 1	0,992 0	0,994 5	0,995 1
0,50	0,950 3	0,963 9	0,975 9	0,981 9	0,986 2	0,990 0	0,991 9	0,994 4	0,995 0
0,51	0,949 9	0,963 5	0,975 6	0,981 8	0,986 1	0,990 9	0,991 8	0,994 4	0,995 0
0,52	0,949 4	0,963 2	0,975 4	0,981 6	0,986 0	0,990 8	0,991 8	0,994 4	0,995 0
0,53	0,949 0	0,962 9	0,975 2	0,981 5	0,985 9	0,990 8	0,991 7	0,994 4	0,995 0
0,54	0,948 5	0,962 6	0,975 0	0,981 3	0,985 8	0,990 7	0,991 7	0,994 4	0,995 0
0,55	0,948 1	0,962 3	0,974 8	0,981 2	0,985 7	0,989 7	0,991 7	0,994 3	0,995 0
0,56	0,947 6	0,961 9	0,974 6	0,981 0	0,985 6	0,989 6	0,991 6	0,994 3	0,995 0
0,57	0,947 2	0,961 6	0,974 5	0,980 9	0,985 5	0,989 5	0,991 6	0,994 3	0,994 9
0,58	0,946 8	0,961 3	0,974 3	0,980 8	0,985 4	0,989 5	0,991 5	0,994 3	0,994 9
0,59	0,946 3	0,961 0	0,974 1	0,980 6	0,985 3	0,989 4	0,991 5	0,994 3	0,994 9
0,60	0,945 9	0,960 7	0,973 9	0,980 5	0,985 2	0,989 3	0,991 4	0,994 2	0,994 9
0,61	0,945 5	0,960 4	0,973 7	0,980 4	0,985 1	0,989 3	0,991 4	0,994 2	0,994 9
0,62	0,945 1	0,960 1	0,973 5	0,980 2	0,985 0	0,989 2	0,991 4	0,994 2	0,994 9
0,63	0,944 7	0,959 9	0,973 3	0,980 1	0,984 9	0,989 2	0,991 3	0,994 2	0,994 9
0,64	0,944 3	0,959 6	0,973 1	0,980 0	0,984 8	0,989 1	0,991 3	0,994 2	0,994 8
0,65	0,943 9	0,959 3	0,973 0	0,979 9	0,984 7	0,989 1	0,991 2	0,994 1	0,994 8
0,66	0,943 5	0,959 0	0,972 8	0,979 7	0,984 6	0,989 0	0,991 2	0,994 1	0,994 8
0,67	0,943 0	0,958 7	0,972 6	0,979 6	0,984 5	0,988 9	0,991 2	0,994 1	0,994 8
0,68	0,942 7	0,958 4	0,972 4	0,979 5	0,984 5	0,988 9	0,991 1	0,994 1	0,994 8
0,69	0,942 3	0,958 1	0,972 2	0,979 3	0,984 4	0,988 8	0,991 1	0,994 1	0,994 8
0,70	0,941 9	0,957 9	0,972 1	0,979 2	0,984 3	0,988 8	0,991 0	0,994 1	0,994 8
0,71	0,941 5	0,957 6	0,971 9	0,979 1	0,984 2	0,988 7	0,991 0	0,994 0	0,994 8
0,72	0,941 1	0,957 3	0,971 7	0,979 0	0,984 1	0,988 7	0,991 0	0,994 0	0,994 7
0,73	0,940 7	0,957 0	0,971 5	0,978 9	0,984 0	0,988 6	0,990 9	0,994 0	0,994 7
0,74	0,940 3	0,956 8	0,971 4	0,978 7	0,983 9	0,988 6	0,990 9	0,994 0	0,994 7
0,75	0,939 9	0,956 5	0,971 2	0,978 6	0,983 9	0,988 5	0,990 8	0,994 0	0,994 7
0,76	0,939 6	0,956 2	0,971 0	0,978 5	0,983 8	0,988 4	0,990 8	0,994 0	0,994 7
0,77	0,939 2	0,956 0	0,970 9	0,978 4	0,983 7	0,988 4	0,990 8	0,993 9	0,994 7
0,78	0,938 8	0,955 7	0,970 7	0,978 3	0,983 6	0,988 3	0,990 7	0,993 9	0,994 7
0,79	0,938 5	0,955 5	0,970 5	0,978 1	0,983 5	3,988 3	0,990 7	0,993 9	0,994 7
0,80	0,938 1	0,955 2	0,970 4	0,907 8	0,983 4	0,988 2	0,990 7	0,993 9	0,994 7

Note : ce tableau est donné à titre indicatif. Il n'est pas prévu pour une interpolation précise. L'extrapolation n'est pas permise.

C

Les mesures de température

6 • LES MOYENS DE MESURAGE

Les mesures de températures de fluides et d'ambiances dans le domaine du génie climatique peuvent être réalisées de différentes manières et, selon les cas, avec des moyens de mesurage adaptés notamment en fonction du niveau de la température et de la précision requise.
Le début de ce chapitre abordera donc la notion de température, puis nous exposerons les moyens dont disposent les techniciens pour procéder à ces mesurages, et enfin nous exposerons les méthodes de mesures correspondantes.
En toute rigueur, la température n'est pas une grandeur mesurable mais seulement repérable. Nous pouvons l'évaluer, la comparer, l'indiquer mais pas la mesurer. Par exemple, contrairement au mètre que l'on peut additionner par mesurage, on ne peut additionner deux températures identiques.
Depuis l'origine de la métrologie en matière de température, nous avons pu voir que la science utilisait plusieurs échelles pour déterminer cette grandeur. Ces méthodes de repérage étaient toutes basées sur des phénomènes physiques observables facilement.
Par ordre d'ancienneté de son auteur :
L'échelle Fahrenheit (du nom du physicien néerlandais Gabriel FAHRENHEIT né en 1686, décédé en 1736) basée l'observation des phénomènes physiques suivants servant de graduations sur une échelle :

– point 0 : température la plus basse réalisée au XVIIIe siècle = – 17,8 °C ;
– point 100 : température voisine de celle du corps humain = 37,8 °C ;
– chaque 1/100e de l'échelle est appelé degré Fahrenheit (°F).

L'échelle Celsius (du nom du physicien suédois Anders CELSIUS né en 1701, décédé en 1744), appelée aussi échelle centésimale, basée sur l'observation des phénomènes physiques suivants servant de graduations sur une échelle :

– point 0 : température la glace fondante = 0 °C ;
– point 100 : température d'ébullition de l'eau sous 1 atmosphère = 100 °C ;
– chaque 1/100e de l'échelle est appelé degré Celsius (°C) (et non degré centigrade !).

L'échelle Kelvin (du nom du physicien britannique William Thomson, plus connu sous le nom de Lord KELVIN, né en 1824, décédé en 1907) basée sur l'observation des phénomènes physiques suivants servant de graduations sur une échelle :

– point 0 : zéro absolu = – 273,15 °C ;
– point 273,16 : température du point triple de l'eau (glace/eau/vapeur) = 0,01 °C ;

– chaque 1/273e de l'échelle est appelé Kelvin (K) (et non degré Kelvin ni °K !).

$$t_C = \frac{t_F - 32}{1{,}8} \Leftrightarrow \; = t_C = 32 + 1{,}8 t_C$$

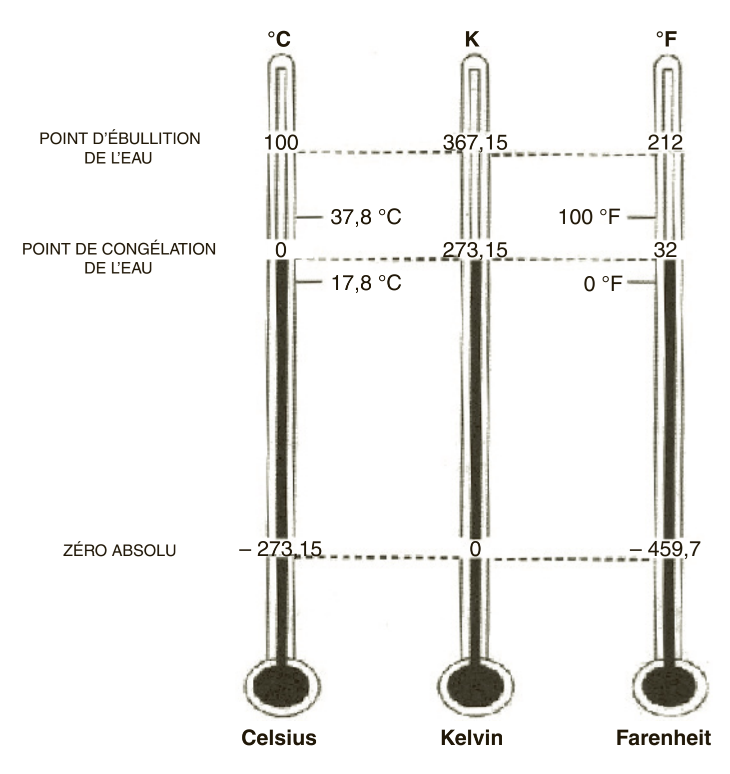


Figure 6.1 – Les échelles de température

Citons pour mémoire, le degré Rankine (du nom du physicien William John Macquorn RANKINE, né en 1820 et décédé en 1872) qui transposa le degré Fahrenheit : °R = °F + 459,67.

Citons aussi le degré Réaumur (du nom du physicien René Antoine FERCHAULT DE RÉAUMUR, né en 1683 et décédé en 1757) qui fut utilisé surtout en Allemagne et en Russie jusqu'à la fin du XIXe siècle.

On distingue deux modes de mesurage de la température :

– Par contact ; il y a contact entre le corps dont on mesure la température et l'élément sensible de l'appareil de mesure. On rencontre différents matériels de mesurage. Principalement :
  - le thermomètre à dilatation de liquide (méthode mécanique) ;
  - le thermomètre à dilatation de gaz (méthode mécanique) ;
  - le thermomètre à dilatation de solide (méthode mécanique) ;
  - le capteur résistif type sonde Pt 100, Pt1000… (méthode électrique) ;
  - le thermocouple (méthode électrique).

– Sans contact ; tout corps émet en permanence un rayonnement électromagnétique dont le spectre continu a une répartition énergétique en fonction de la température. C'est ce que l'on appelle communément le rayonnement thermique. On rencontre principalement en génie climatique : le thermomètre infra-rouge à visée laser (méthode optique)

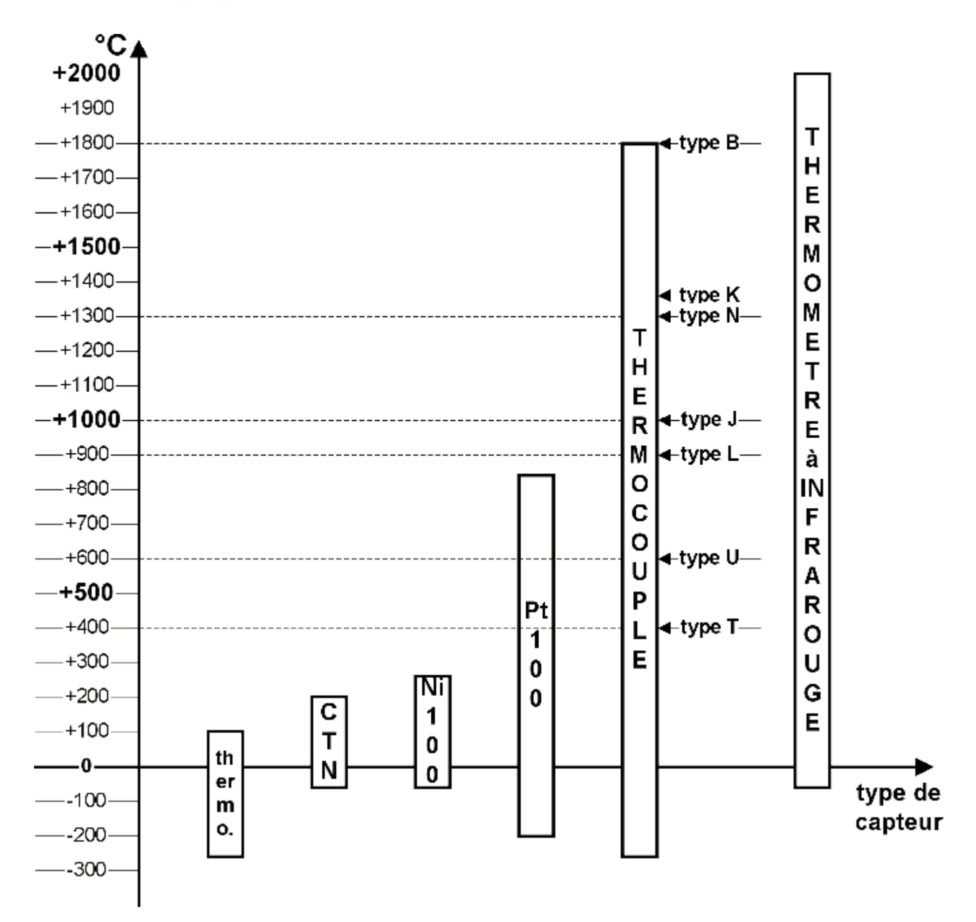


Figure 6.2 – Échelle d'utilisation des différents capteurs de température

Définitions principales (NF EN ISO 7726) :

– constante de temps d'un capteur : « La constante de temps d'un capteur est considérée comme numériquement égale au temps mis par le capteur, en réponse à une variation en forme d'échelon de la grandeur mesurée, pour atteindre 63 % de sa variation finale en état stationnaire sans dépassement ».

– temps de réponse d'un capteur : « Le temps de réponse d'un capteur est pratiquement le temps au bout duquel on peut considérer la grandeur mesurée (par exemple la température du thermomètre) comme suffisamment proche de la valeur exacte de la grandeur à mesurer (par exemple la température de l'air). Il peut être calculé à partir de la constante de temps ; le temps de réponse à 90 % peut être atteint au bout d'un temps égal à 2,3 fois la constante de temps ».

6.1 Le thermomètre à dilatation de liquide à lecture directe

D'un usage très courant, le thermomètre à dilatation de liquide a pourtant des limites en terme de précision de mesure (au mieux ± 0,1 °C mais plus couramment ± 1 °C), mais cela est compensé par une grande facilité d'utilisation (pas besoin de source d'énergie).

6.1.1 Principe de fonctionnement

Généralement construit en verre, le corps du thermomètre est constitué d'un capillaire rempli d'un volume de liquide très sensible aux variations de température. La grandeur thermométrique est le volume apparent d'une masse invariable de liquide enfermé dans un récipient (qui se dilate aussi…). L'ensemble est gradué en volume :

$$V = V_0(1 + \lambda\theta)$$

avec :
V = volume final du liquide.
V_0 = volume initial du liquide.
λ = cœfficient de dilatation apparent de l'ensemble liquide-verre.
θ = température ambiante dans laquelle est plongé le thermomètre.

On peut citer comme liquide :

– le mercure ; encore parfois rencontré sur d'ancien thermomètre car ce liquide présente une très bonne linéarité entre –30 °C et 350 °C (solidification à –39 °C et ébulition à 357 °C).
– Il ne mouille pas le verre et son ménisque convexe favorise une lecture précise (voir le schéma B-2 du chapitre Aéraulique). Il est facile à purifier, pour augmenter la précision car exempt de particules étrangères, et a une bonne conductivité thermique ($\lambda = 16.10^5$ /°C).
– Ce type de thermomètre n'est plus fabriqué en raison de la toxicité du mercure ;
– l'alcool présente l'inconvénient de ne pas avoir un coefficient de dilatation linéaire entre –80 °C et 70 °C ;
– le tolvène ; utilisable entre –90 °C et 100 °C ;
– le pentane ; utilisable entre –220 °C et 30 °C.

Il est à noter que le capillaire se dilate aussi en fonction de la température, *a fortiori* s'il est en verre. On trouve des capillaires en silice moins sensible à ce phénomène. De plus, le verre a tendance à se rétracter en vieillissant, ce qui fausse aussi le mesurage.
Les thermomètres de précision à dilatation de liquide sont vendus avec une courbe de correction pour tenir compte de la non-linéarité de la dilatation du liquide.

6.1.2 Principe de mesurage

Le thermomètre est en contact direct avec le corps dont on souhaite connaître la température.
La mesure dans l'air ambiant ne pose pas de problème particulier.

Par contre, la longueur d'émergence du capillaire lorsque celui-ci est trempé dans un liquide fausse la mesure car la partie « extérieure » ne se dilate pas comme la partie immergée, que ce soit le liquide ou son enveloppe. Il y a donc lieu de respecter le repère d'immersion prescrit par le constructeur.

6.2 Le thermomètre à dilatation de liquide à lecture indirecte

6.2.1 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement est le même que celui décrit précédemment mais à la différence que la dilatation volumique du liquide crée cette fois-ci une variation de pression qui exerce une force sur l'axe de rotation d'une aiguille qui se déplace sur un repère gradué.

6.2.2 Principe de mesurage

S'il est étanche, ce thermomètre peut être utilisé dans un liquide. Généralement, on se contente de l'utiliser dans l'air ambiant ou dans un gaz inerte non corrosif.

6.3 Le thermomètre à dilatation de gaz

6.3.1 Principe de fonctionnement

Ce dispositif est basé sur la loi des gaz parfaits (PV/T = constante) relative à la dilatation d'un gaz à volume constant. Lorsque la pression augmente en fonction de la température, le gaz contenu dans le bulbe et le manomètre exerce une force sur l'axe de rotation d'une aiguille qui se déplace sur un repère gradué.
Le gaz employé doit être le plus parfait possible, c'est-à-dire avec une chaleur spécifique à pression constante en fonction de la température ($C_p f(T)$ = cste). C'est souvent l'azote N_2 qui est utilisé.

6.3.2 Principe de mesurage

Idem les thermomètres à dilatation de liquide à lecture indirecte.

6.4 Le thermomètre à dilatation de solide

6.4.1 Principe de fonctionnement

Plus connu sous le nom de thermomètre à bilame, le thermomètre est constitué de deux lamelles métalliques soudées l'une à l'autre. Les deux lamelles étant de natures différentes, donc de coefficient de dilatation différent, la variation de température engendre un couple mécanique faisant fléchir dans un sens ou dans l'autre.
Ce type de thermomètre n'est pas très précis et on l'utilise plutôt cette fonction du bi-lame en mesure avec une précision de ± 1 °C, voire en simple contacteur « Tout ou Rien » notamment pour les installations de sécurité.

6.4.2 Principe de mesurage

Idem les thermomètres à dilatation de liquide à lecture indirecte.

6.5 Le capteur à résistance type Pt100

6.5.1 Principes de fonctionnement

Les capteurs à résistance sont des thermomètres utilisant la variation de la résistivité d'un matériau en fonction de la température. Le fil résistif est monté dans une gaine ou bobiné sur un support tel que la céramique ou l'alumine qui ont un coefficient de dilatation proche de celui du platine.
Quel que soit le mode d'enrobage, les sondes à résistance sont le plus souvent placées à l'intérieur d'une gaine métallique ou d'un tube en verre de 15 à 35 mm de long et de 3 à 6 mm de diamètre (Figure 6.3).

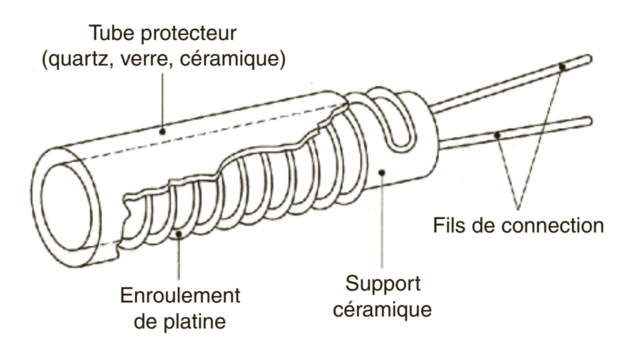
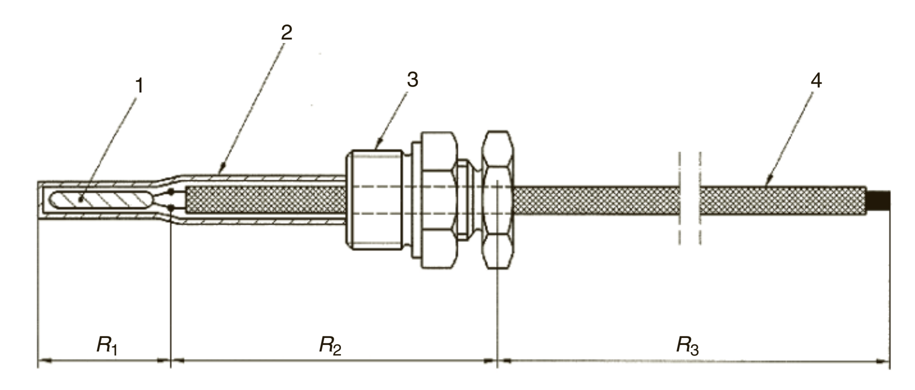


Figure 6.3 – Détail de l'élément sensible



Légende

R_1 Résistance de l'élément sensible en température
R_2 Résistance du câble interne
R_3 Résistance du câble

1 Élément sensible en température
2 Enveloppe de protection
3 Filetage
4 Câbles

Figure 6.4 – Sonde de température à résistance de platine à 2 fils (doc. AFNOR)

La résistance ohmique augmente avec la température selon la relation :

$$R_t = R_0[1 + \alpha(t - t_0)]$$

avec :
R_t = résistance à t °C, exprimée en Ω.
R_0 = résistance à (t_0 = 0 °C), exprimée en Ω.
$\alpha = \dfrac{R_{100} - R_0}{100 R_0}$ = coefficient de température de la thermo-résistance (de l'ordre de 4.10^{-3} °C^{-1} pour le platine).
R_{100} = résistance à (t_{100} = 100 °C), exprimée en Ω.

Pour les conducteurs métalliques type platine ou nickel, la variation de la résistance en fonction de la température est à peu près linéaire et la sensibilité constante.
Les résistances sont réalisées en nickel (Ni), en cuivre (Cu), en tungstène (W) ou en platine (Pt).
Le nickel a une très bonne sensibilité thermique. Entre 0 °C et 100 °C, sa sensibilité est multipliée par 1,617 contre « seulement » 1,385 pour le platine. Par contre il est très sensible à l'oxydation et on limite son utilisation à 250 °C.
Le cuivre a une grande linéarité lors des variations thermiques de sa résistance mais celle-ci est très faible, ce qui oblige à utiliser une plus grande longueur de fil donc avec un encombrement plus important. On limite son utilisation à 180 °C.
Le tungstène a une meilleure sensibilité thermique que le platine à 100 K et il est utilisable à des températures plus élevées avec une linéarité meilleure. De part sa résistance élevée, son encombrement est minimum. Par contre, en raison du procédé de fabrication qui ne permet d'éliminer complètement par recuit les contraintes créées par le tréfilage, le tungstène a une stabilité inférieure à celle du platine.

Pourquoi préférer le platine comme matériau pour les capteurs de température à résistance (aussi appelé PRTD pour *Platinium Resistance Temperature Detector*) ?

- il est inaltérable ;
- ce matériau peut être très pur, ce qui permet l'interchangeabilité des sondes ;
- plus un matériau est pur, plus son coefficient de température α est grand ;
- son domaine d'emploi entre – 250 °C et 630 °C correspond bien avec le domaine du génie climatique ;
- il ne présente pas d'hystérésis (la loi de montée en température se superpose exactement avec la loi de descente en température) ;
- sa résistivité est grande, ce qui permet un encombrement plus faible à résistance égale, donc une constante de temps plus petite ;
- il a une sensibilité de l'ordre de 0,4 Ω/°C à 100 °C ;
- il reste stable dans le temps (1 °C pour un échantillon exposé à 600 °C pendant 6 000 heures ;
- il n'est quasiment pas influencé par les champs magnétiques.

Le platine est reconnu comme instrument d'interpolation entre – 259,34 °C (13,81 K) et 961,78 °C (688,63 K) pour définir l'EIT (Échelle Internationale de Température).

Tableau 6.1 – Caractéristiques physiques des différents métaux

Paramètre	Nickel	Cuivre	Tungstène	Platine
température de fusion (°C)	1 453	1 083	3 380	1 769
chaleur massique à 20 °C ($J.°C^{-1}.kg^{-1}$)	450	400	125	135
conductivité thermique ($W.°C^{-1}.m^{-1}$)	90	400	120	73
coefficient de dilatation linéaire ($°C^{-1}$)	$12,8.10^{-6}$	$16,7.10^{-6}$	6.10^{-6}	$8,9.10^{-6}$
résistivité à 20 °C (Ω.m)	10.10^{-8}	$1,72.10^{-8}$	$5,52.10^{-8}$	$10,6.10^{-8}$
coefficient de température à 20 °C ($°C^{-1}$)	$4,7.10^{-3}$	$3,9.10^{-3}$	$4,5.10^{-3}$	$3,9.10^{-3}$

Pour la sonde Pt100 normalisée (NF EN 60751 qui couvre la gamme – 200 °C à + 850 °C), le coefficient α est égal à 0,003 851 $°C^{-1}$ (quelquefois considéré égal à 0,003 850 55).
A la différence de la norme américaine où le coefficient α de la sonde Pt100 est égal à 0,003 916 $°C^{-1}$, d'où certaine différence dans les résultats.
Par exemple, pour une température de 40 °C, la résistance Pt100 aura une résistance théorique de :
$R_{40} = 100\ [1 + 0,003\ 851\,(40\text{-}0)] = 115,40 \cong 115,54$ du tableau 1 de la norme NF EN 60751 (tab D.3-X en annexe).
Les relations températures/résistance pour résistance de platine de résistance nominale 100 Ω s'expriment selon les gammes de températures :
Entre –200 °C et 0 °C :

$$R_t = R_0\ [1 + At + Bt^2 + C\,t^3\ (t - 100)]$$ (équation de Callendar et Van Dusen)

Entre 0 °C et 850 °C :

$$R_t = R_0\ (1 + At + Bt^2)$$

avec :
R_t est la résistance à la température t.
R_0 est la résistance à $t = 0$ °C.

$$A = \text{constante} = 3,908\ 3.10^{-3} = \alpha + \frac{\alpha.\delta}{100}.$$

$$B = \text{constante} = -\ 5,775.10^{-3} = \frac{\alpha.\delta}{100^2}.$$

$$C = \text{constante} = -\ 4,183.10^{-3} = \frac{\alpha.\beta}{100^4}.$$

Avec :
α = 0,003 916 = coefficient de température à 0 °C.
β = 0,108 63 = coefficient de linéarisation pour les températures < 0 °C (β = 0 pour température > 0 °C).
δ = 1,499 9 = coefficient de linéarisation.
Les tableaux 8.1 et 8.2 donnent directement les valeurs des résistances entre – 200 °C et + 850 °C d'une résistance de platine de résistance nominale $R_0 = 100$ Ω.

Nota

Pour les autres valeurs nominales telles que 10 Ω, 500 Ω ou 1 000 Ω, le tableau peut être utilisé en multipliant les valeurs par le facteur $R_0/100\ \Omega$.

Les valeurs de température données dans la norme NF EN 60751 sont exprimées en degré Celsius et par le symbole *t* en accord avec la l'Echelle Internationale de Température de 1990 (EIT-90). Les tableaux 8.1 et 8.2 extraits de cette norme le rappellent par l'indication « t_{90}/°C ».

Valeurs de tolérance

Les valeurs de tolérance des thermomètres à résistance sont classées de AA à C (Tableau 6.2). Ces résistances s'appliquent à toute valeur R_0.

Tableau 6.2 – Classe de tolérance des thermomètres à résistance

Classe de tolérance	Domaine valide de température (°C)		Valeurs de la tolérance[a] (°C)
	Résistances bobinées	Résistance à film	
AA	– 50 à + 250	0 à 150	± (0,1 + 0,0017 I *t* I)
A	– 100 à + 450	– 30 à + 300	± (0,15 + 0,002 I *t* I)
B	– 196 à + 600	– 50 à + 500	± (0,3 + 0,005 I *t* I)
C	– 196 à + 600	– 50 à + 600	± (0,6 + 0,01 I *t* I)

a I t I = valeur absolue de température en °C sans considération de signe

La valeur limite de – 196 °C correspond pour sa proximité avec la température d'ébullition de l'azote liquide.

Tous les constructeurs nationaux de matériels de mesure ne se réfèrent pas la norme française NF EN 60751. Ci-dessous un tableau de correspondance entre la norme NF et la norme allemande DIN.

Tableau 6.3 – Tableau de correspondance entre les tolérances NF et DIN (doc. KIMO)

Temps °C	Tolérances									
	Classe B		Classe A		1/3 DIN		1/5 DIN		1/10 DIN	
	± °C	± Ohms	± °C	± Ohms	± °C	± Ohms	± °C	± Ohms	± °C	± Ohms
– 200	1,3	0,56	0,55	0,24	0,44	0,19	0,26	0,11	0,13	0,06
– 100	0,8	0,32	0,35	0,14	0,27	0,11	0,16	0,06	0,08	0,03
0	0,3	0,12	0,15	0,06	0,1	0,04	0,06	0,02	0,03	0,01
100	0,8	0,3	0,35	0,13	0,27	0,1	0,16	0,05	0,08	0,03
200	1,3	0,48	0,55	0,2	0,44	0,16	0,26	0,1	0,13	0,05
300	1,8	0,64	0,75	0,27	0,6	0,21	0,36	0,13	0,18	0,06
400	2,3	0,79	0,95	0,33	0,77	0,26	0,46	0,16	0,23	0,08
500	2,8	0,93	1,15	0,38	0,94	0,31	0,56	0,19	0,28	0,09
600	3,3	1,06	1,35	0,43	1,1	0,35	0,66	0,21	0,33	0,1
650	3,6	1,13	1,45	0,46	1,2	0,38	0,72	0,23	0,36	0,11
700	3,8	1,17								
800	4,3	1,28								
850	4,6	1,34								

La tolérance en classe b est 3 fois plus élevée qu'en classe 1/3 DIN, 5 fois plus élevée qu'en classe 1/5 DIN et 10 fois plus élevée qu'en classe 1/10 DIN.
La figure 6.5 permet d'apprécier les exigences comparées en terme de tolérances relatives de la norme NF/CEI (classes A et B) par rapport à la norme DIN (1/3, 1/5 et 1/10 DIN) et de remarquer l'importante divergence à partir de 0 °C.

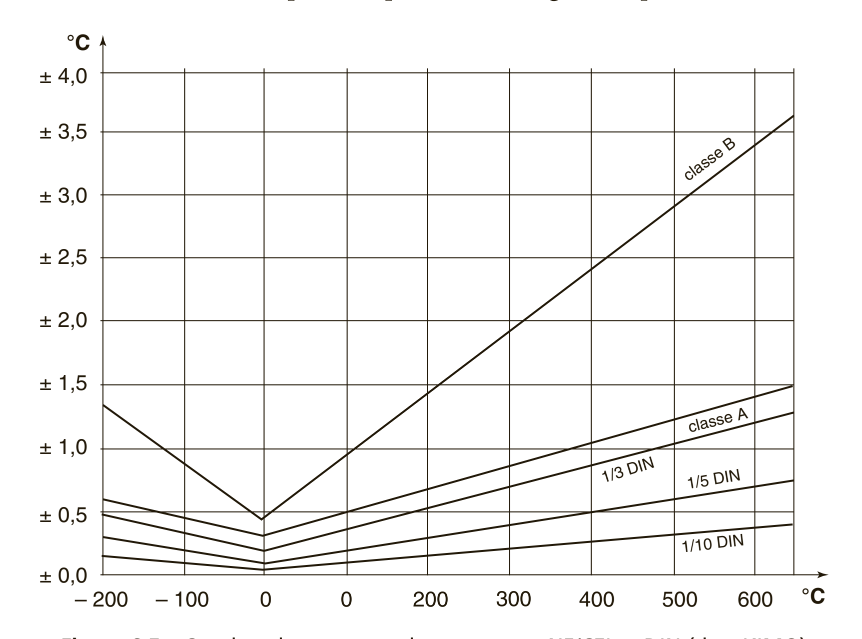


Figure 6.5 – Courbes de correspondance normes NF/CEI et DIN (doc. KIMO)

■ Les différents modes de raccordement

Les sondes à résistance thermoélectrique en platine sont construites pour être raccordées à 2, 3 ou 4 conducteurs, selon la précision souhaitée. La différence résidant dans la résistance de ces conducteurs de liaison entre la sonde platine et le convertisseur de mesure 4-20 mA. Selon l'éloignement de l'un par rapport à l'autre, il est important de respecter le bon nombre de conducteurs et leur montage.

□ Montage 2 fils

C'est le type de montage le plus simple mais il présente l'inconvénient en pratique de mettre en série la résistance de l'élément sensible et celles des conducteurs de raccordements.

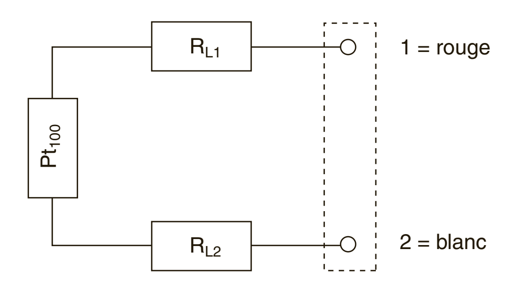


Figure 6.6 – Montage 2 fils

C'est le montage le plus utilisé pour les appareils de mesure portatif car le plus économique. Il est rendu acceptable par le fait que la sonde est relativement proche du transmetteur.

☐ Montage 3 fils

Ce montage implique l'utilisation de conducteurs R_{L1}, R_{L2} et R_{L3} de même caractéristique. En déduisant la résistance $R_{L1} + R_{L2}$ de la mesure aux bornes 2 et 3, on corrige le décalage de mesure.
C'est un montage très utilisé pour les sondes raccordées relativement loin du transmetteur.

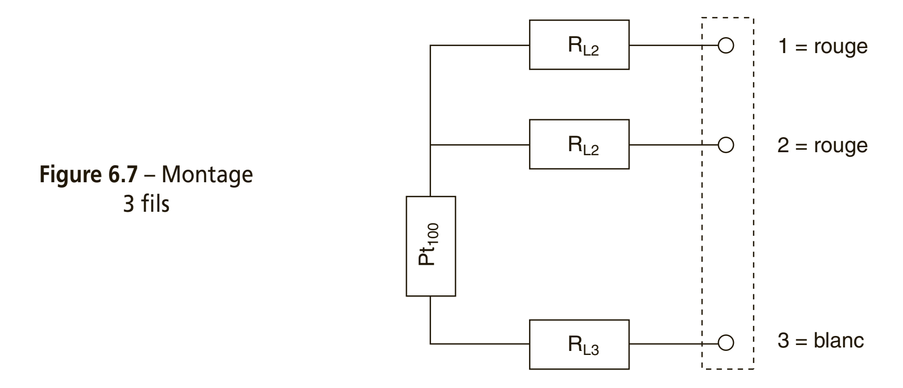


Figure 6.7 – Montage 3 fils

Tous les thermomètres dont la classe de tolérance est supérieure à la classe B doivent avoir une configuration à 3 ou 4 fils.

☐ Montage 4 fils

En faisant passer un courant *I* constant par les bornes 1 et 4 et en mesurant la tension *U* aux bornes 2 et 3, on s'affranchit des résistances des lignes. C'est le montage le plus précis mais aussi le plus onéreux.

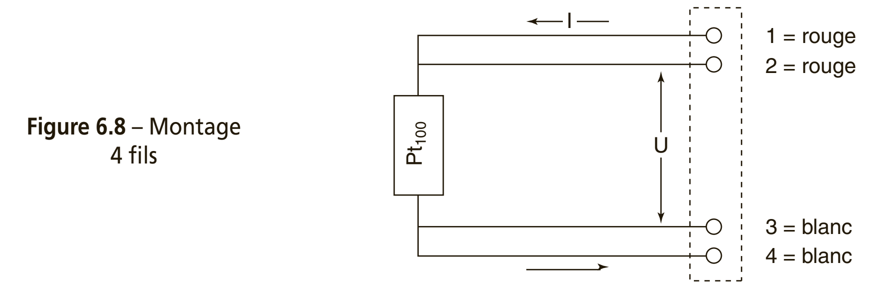


Figure 6.8 – Montage 4 fils

Tous les thermomètres dont la classe de tolérance est supérieure à la classe B doivent avoir une configuration à 3 ou 4 fils.
Il est possible de placer le convertisseur de mesure 4-20mA dans la tête de la sonde mais cette solution présente l'inconvénient d'exposer le transmetteur aux conditions thermiques de la sonde. Il y a donc lieu d'utiliser des transmetteurs capables

de supporter les hautes températures si nécessaires (voir les recommandations du constructeur).
Par contre, l'avantage de cette solution est de ne véhiculer que du courant de 4 à 20 mA par deux conducteurs banalisés (pas besoin d'utiliser des câbles de compensation) vers la centrale d'acquisition de données sans risque de perte en ligne. S'il se produit un défaut sur la ligne, le signal sera interrompu (fonction binaire « 0 » ou « 4-20 »), contrairement à la transmission de tension 0-10 V qui peut être perturbée à l'insu de l'opérateur

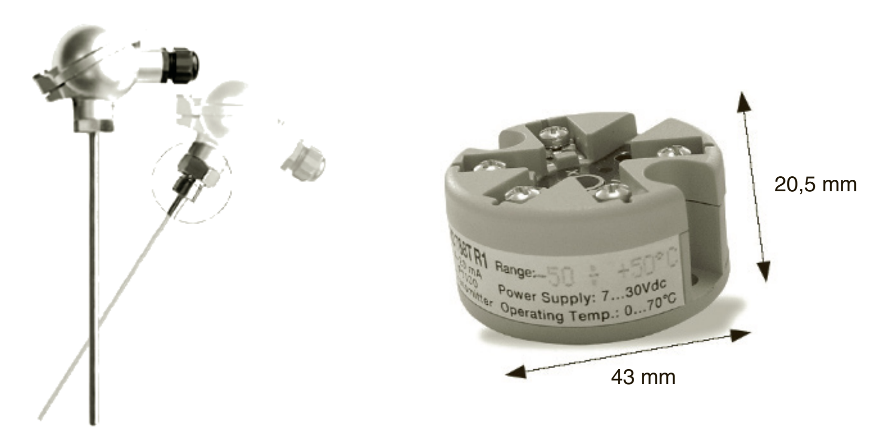


Figure 6.9 – Modèles de sonde (doc. KIMO)

Figure 6.10 – Tête de sonde DIN B 3fils (doc. KIMO)

La nature des conducteurs de raccordement est aussi très importante. Selon la distance qui sépare la sonde du convertisseur, il y a lieu de se méfier des pertes en ligne, voire aussi des interférences électromagnétiques qui imposent l'usage de conducteurs renforcés par de la tresse blindée.
De même, les conditions ambiantes dans lesquelles vont séjourner la sonde et les conducteurs sont des paramètres de sélection (voir tableau 6.6, principaux couples thermoélectriques (NF EN 60584)).

Tableau 6.4 – Sélection longueur de câble pour sonde de température à 2 fils (NF EN 1434-2)

Section de câble en mm^2	Longueur maximale pour Pt100
0,22	2,5
0,50	5,0
0,75	7,5
1,50	15,0

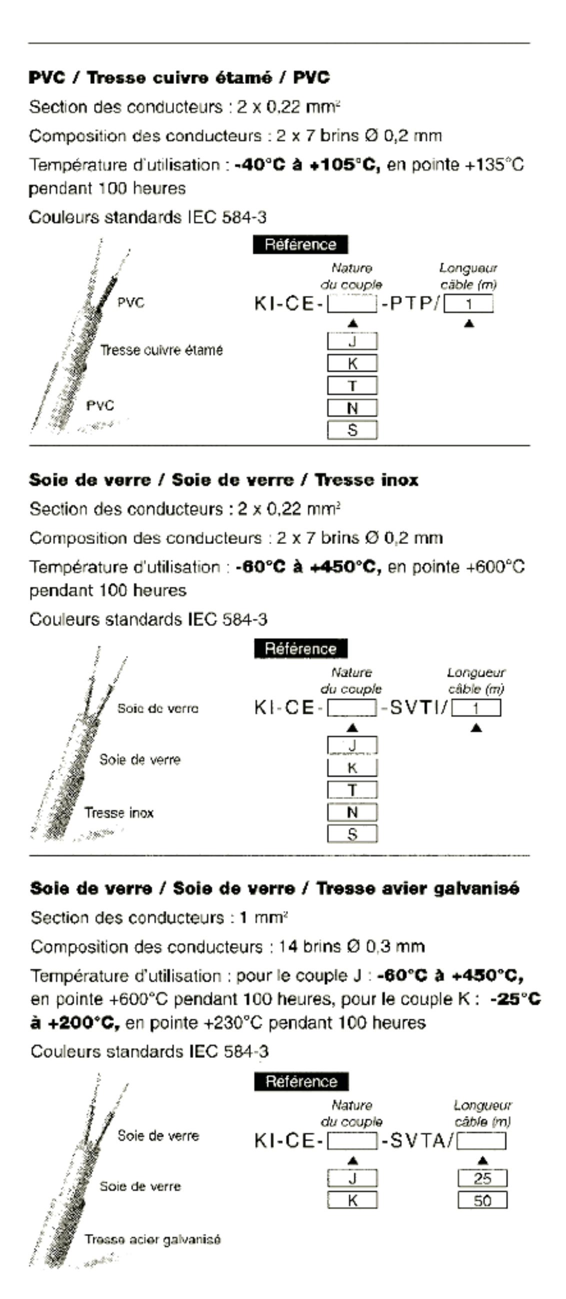


Figure 6.11 – Exemple de sélection de câbles d'extension et de compensation (doc KIMO)

6.5.2 Principes de mesurage

Placée dans la conduite, que ce soit une canalisation hydraulique ou en gaine aéraulique, la sonde doit être parfaitement irriguée et l'élément sensible placé dans un endroit où la température du fluide est représentative. On la place généralement

dans l'axe de la conduite pour limiter le rayonnement de la paroi extérieure ou dans un coude pour bénéficier des turbulences et ainsi mesurer une température moyenne représentative (voir figure 7.1).
Deux solutions :

– la sonde est glissée dans un doigt de gant, aussi appelé gaine thermométrique et puit thermométrique, installé à demeure sur le réseau et bien placé dans le flux ;
– la sonde est déjà protégée par un doigt de gant que l'on visse sur une attente en place sur le réseau.

C'est la première solution qui est toujours pratiquée dans le cas d'installations hydrauliques car elle n'occasionne pas l'arrêt obligatoire de l'installation si l'on souhaite déposer la sonde, pour étalonnage par exemple. Voir figures 6.12 et 6.13. Lors du remontage, il y aura lieu de vérifier qu'aucun élément étranger n'est venu se déposer au fond du doigt de gant, de la poussière par exemple, car cela occasionnerait une modification de la résistance thermique de l'ensemble « sonde + doigt de gant » qui pourrait laisser croire à une dérive de mesure de la sonde. Dans cet objectif, les doigts de gant sont souvent soudés sur une génératrice horizontale de la conduite et équiper d'un bouchon amovible afin d'éviter tout dépôt intempestif.

Légende

1 Schéma de la tête
2 Passage du câble de signal
3 Emplacement du dispositif de sécurité
4 Enveloppe de protection
5 Élément sensible en température

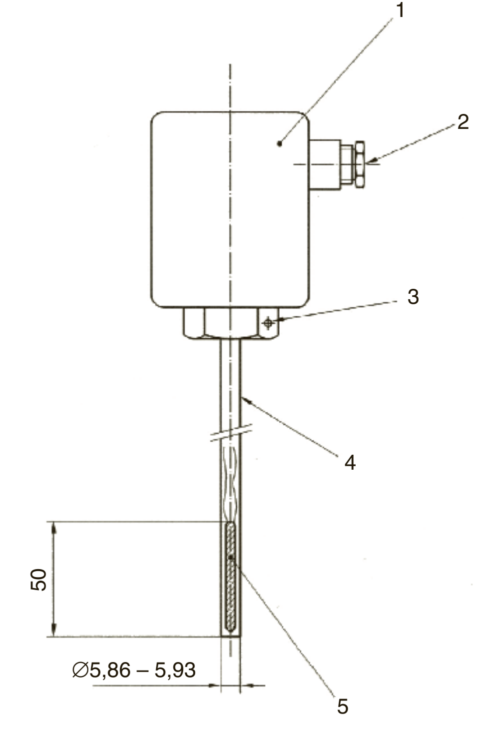
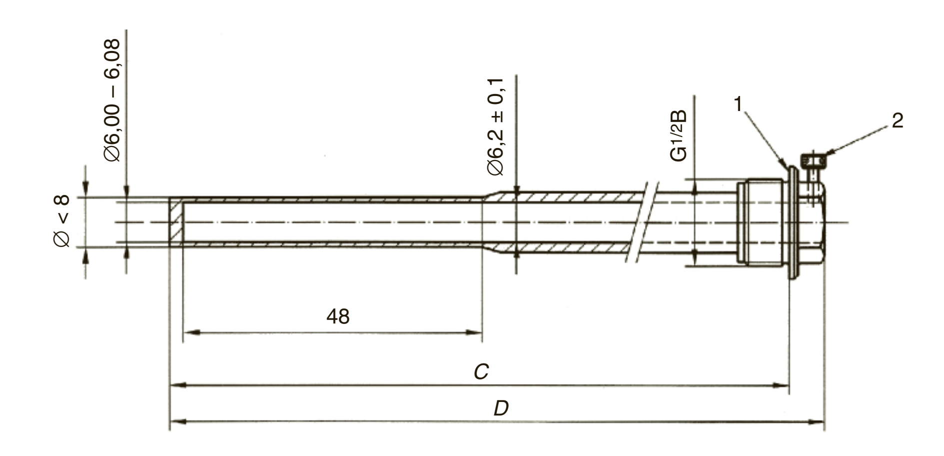


Figure 6.12 – Sonde de température type PL, montage en doigt de gant (NF EN 1434)



Filetage G 1/2 B conforme à l'EN ISO 228-1

Autres longueurs	
C	D
85	≤ 100
120	≤ 135
210	≤ 225

Légende

1 Face d'étanchéité
2 Vis de serrage avec emplacement du dispositif de sécurité

Figure 6.13 – Doigt de gant (NF EN 1434)

Pour améliorer la conductivité thermique dans le doigt de gant, la sonde peut être enduite d'une pâte contact type silicone thermo-conducteur au niveau de l'élément sensible.

La seconde solution, dite « montage en direct », est acceptable dans le cas d'installation aéraulique si des bouchons sont prévus pour éviter les fuites d'air après démontage. Voir figure 6.14 (au verso).

Dans les deux cas, le doigt de gant protège la sonde contre les agressions chimiques et physiques du fluide véhiculé, notamment en fonction de la pression dans la conduite.

Pour les canalisations jusqu'à DN250 inclus, trois types de capteurs de température sont normalisés :

– capteurs courts montés en direct, type Direct Short ;
– capteurs courts montés en direct, type Direct Long ;
– capteurs courts montés en direct, type Probe Long.



Légende

A Longeur immergée

1 Schéma de la tête
2 Passage du câble de signal
3 Emplacement de passage du fil de scellement
4 Emplacement du dispositif de sécurité
5 Face d’étanchéité
6 Enveloppe de protection
7 Élément sensible en température

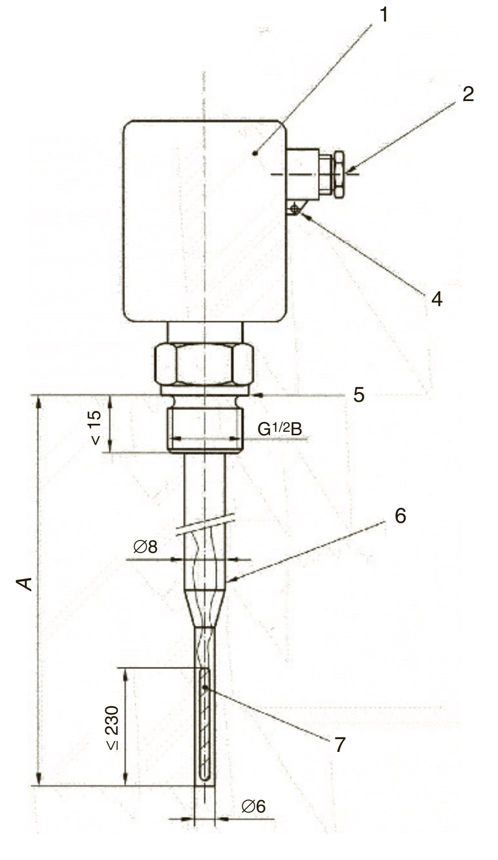


Figure 6.14 – Sonde de température type DL, montage en direct (NF EN 1434)

6.6 Le capteur à résistance CTN

Les capteurs à résistance CTN (coefficient de température négative), appelé aussi thermistances, ont une résistance qui décroît lorsque la température augmente.

Sa résistance est plus élevée que les capteurs Pt100 ; exemple : 10 kΩ à 25 °C au lieu de 100 Ω à 0 °C.

Elle est plus utilisée que le capteur Pt100 dans le domaine du génie climatique car sa précision est meilleure dans la plage de température de 0 °C à 70 °C en classe A.

Par contre, à la différence des sondes à résistance de platine, les sondes CTN ne présentent pas une bonne linéarité. Leur résistance est aussi beaucoup plus grande et leur variation en fonction de la température est plus élevée. Il y a donc lieu de bien maîtriser la plage de mesure pour choisir la courbe qui se rapprochera le plus de l’évolution de la température (voir tableau 6.5).

6.6.1 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement est identique au capteur Pt100 décrit ci-avant.

Tableau 6.5 – Les classes de précision

Désignation	Température (°C)	Écart maximal normalisé (°C)		
		Classe A	Classe B	1/5 DIN
Pt100	– 200	± 0,55	± 1,30	± 0,26
	– 100	± 0,35	± 0,80	± 0,16
	0	± 0,15	± 0,30	± 0,06
	+ 100	± 0,35	± 0,80	± 0,16
	+ 200	± 0,55	± 1,30	± 0,26
	+ 300	± 0,75	± 1,80	± 0,36
	+ 400	± 0,95	± 2,30	± 0,46
CTN	de – 20 °C à 0 °C	± 0,40		
	de 0 °C à 70 °C	± 0,10		
	de 70 à 125 °C	± 0,60		

6.6.2 Principe de mesurage

Le principe de mesurage est identique au capteur Pt100 décrit ci-avant.

6.7 Le thermocouple

Le thermocouple est un moyen de mesurage très utilisé dans le domaine du génie thermique, dans les centrales de production de chaleur notamment, car ses composants sont relativement solides, à comparer au capteur Pt100 exposé ci-avant.
Par contre, leur précision est moins bonne que celle du capteur Pt100 et leur courbe de réponse n'est pas linéaire ce qui nécessite aussi une bonne maîtrise des caractéristiques du thermocouple utilisé.

6.7.1 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement du thermocouple repose sur la force électromotrice (f.e.m.) qui se crée naturellement entre deux fils conducteurs de natures différentes réunis à leurs extrémités. C'est ce que l'on appelle l'effet SEEBECK, du nom du savant allemand (1770-1831) qui découvrit ce principe en 1821.
Cette f.e.m. dépend de la température à laquelle est exposée une des deux jonctions. On la mesure sous forme d'une tension de quelques millivolts.
Le thermocouple est donc constitué de deux jonctions (ou soudures) reliant chacune deux métaux ou alliages différents. L'une des jonctions, placée au point de mesure, constitue la soudure chaude (Sc). L'autre jonction appelée soudure froide (Sf) et dont la température est connue, sert de point de référence. Si la boucle est ouverte, on peut mesurer la tension aux bornes.

Dans le schéma ci-dessous, la soudure froide Sf est à la température T1 et la soudure chaude Sc est à la température T2 que l'on souhaite connaître.

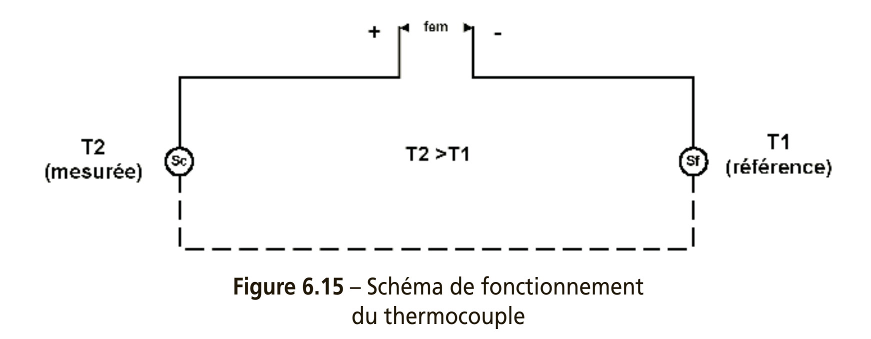


Figure 6.15 – Schéma de fonctionnement du thermocouple

Pour deux matériaux ou alliages donnés, il existe une relation entre la force-électromotrice et les températures de référence et de mesure. Cette relation est indépendante de la forme et des dimensions des fils, et s'exprime généralement par une courbe caractéristique non linéaire.

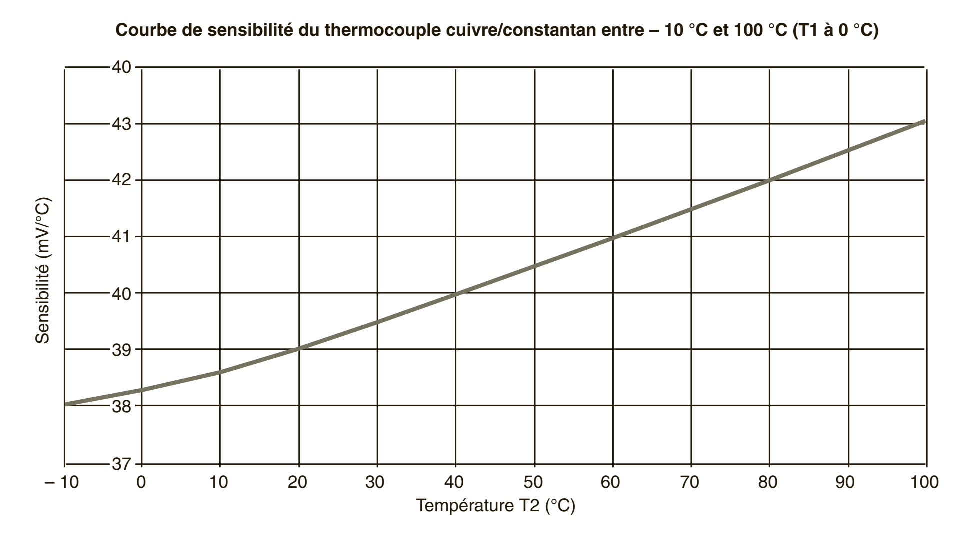


Figure 6.16 – Exemple : courbe de sensibilité du thermocouple cuivre/constantan entre –10 °C et 100 °C

Le couple cuivre/constantan est l'un des plus couramment utilisés. Le constantan est un alliage de cuivre et de nickel dont la résistance électrique est pratiquement indépendante de la température. Le type de thermocouple varie en fonction de la proportion d'alliage, le terme « constantan » restant générique.

La précision obtenue avec ces appareils de mesure est de l'ordre de ± 3 °C entre 0 °C et 400 °C, et ± 0,7 % entre 400 °C à 500 °C (à comparer à celle du capteur à résistance métallique type « fil chaud » ; ± 1 °C jusqu'à 150 °C, et 0,70 % de 150 °C à 500 °C).

Tableau 6.6 – Principaux couples thermoélectriques (NF EN 60584)

Type	MÉTAUX		LIMITES D'UTILISATION (°C) selon NF EN 60584-1 Tables de référence		F.E.M. DÉVELOPPÉE avec t référence = 0 °C (µV)		TOLÉRANCE Classe de tolérance 2 selon NF EN 60584-2	
	positif	négatif			à 20 °C	à 100 °C	NOTE 1	
T	Cuivre	Cuivre-Nickel	– 270	400	790	4 279	– 40 à 133 °C 133 à 350 °C	± 1 °C ± 0,0075 |t|
E	Nickel- Chrome	Cuivre-Nickel	– 270	1 000	1 192	6 319	– 40 à 333 °C 333 à 900 °C	± 2,5 °C ± 0,0075 |t|
J	Fer	Cuivre-Nickel	– 210	1 200	1 019	5 269	– 40 à 333 °C 333 à 750 °C	± 2,5 °C ± 0,0075 |t|
K	Nickel- Chrome	Nickel- Aluminium	– 270	1 370	798	4 096	40 à 333 °C 333 à 1 200 °C	± 2,5 °C ± 0,0075 |t|
R	Platine rhodié (13 %)	Platine	– 50	1 760	111	647	0 à 600 °C 600 à 1 600 °C	± 1,5 °C ± 0,0025 |t|
S	Platine rhodié (10 %)	Platine	– 50	1 760	113	646	0 à 600 °C 600 à 1 600 °C	± 1,5 °C ± 0,0025 |t|
B	Platine rhodié (30 %)	Platine rhodié (6 %)	0	1 820	–3	33	600 à 1 700 °C	± 0,0025 |t|
N	Nickel-Chrome- Silicium	Nickel- Silicium	– 270	1 300	525	2 774	40 à 333 °C 333 à 1 200 °C	± 2,5 °C ± 0,0075 |t|

Nota

Composition des alliages :
– Nickel / Constantan = 45 % Ni / 55 % constantan.
– Nickel / Chromel = 90 % Ni / 10 % Cr.
– Chromel / Alumel = 95 % Ni / 2 % Mn / 2 %Al.

Le thermocouple type B (appelé aussi thermocouple à 18 % en allusion à sa composition de (30 % + 6 %)/2) présente une zone d'incertitude fluctuante entre 0 et 50 °C (– 0,003 mV à + 0,003 mV) et jusqu'à 100 °C (0,033 mV). Cela l'amène à être utilisé dans la plage nettement supérieure de 600 à 1 700 °C.

La tolérance d'un couple thermoélectrique est l'écart maximal (spécifié dans la norme NF EN 60584) en degrés Celsius à partir des tables de référence lorsque la température de jonction de référence est à 0 °C, et que la jonction de mesure est à la température à mesurer (t°C).

Il existe aussi des thermocouples à base de tungstène (W) allié à du rhénium (Re) : le thermocouple type C (W + 5 % Re et W + 26 % Re), le type D (W + 3 % Re et W +25 % Re) et le type G (W et W + 26 % Re).

Les thermocouples peuvent se présenter sous des formes différentes :

– en bobine de fils nus ;
– en bobine de fils de 2 conducteurs isolés ;
– en gaine métallique.

Les conducteurs sont isolés séparément par de la magnésie ou de l'alumine, et emprisonnés dans une gaine métallique déformable et étanche. Les jonctions chaudes (sources chaudes) sont généralement réalisées par le constructeur. Elles peuvent être à nu, noyées dans la gaine ou encore soudées à celle-ci.

La jonction isolée présente un temps de réponse relativement long.

Tableau 6.7 – Tableau de synthèse des couples thermoélectriques (doc KIMO)

couples symboles	NATURE DES MÉTAUX +	NATURE DES MÉTAUX −	température d'utilisation normale en °C	TOLÉRANCES classe 1	TOLÉRANCES classe 2	F.E.M. à 100°C en mV	EXTENSION(2) classe 1	EXTENSION(2) classe 2	COMPENSATION(3)	NATURE DES MÉTAUX +	NATURE DES MÉTAUX −	Résistance linéique à 20°C (Ohm.km/mm²) +	Résistance linéique à 20°C (Ohm.km/mm²) −
T	Cuivre **Cu**	Cuivre-Nickel T ou Advance* ou Constantan* **Cu-Ni**	-200°C à +350°C	-40°C à +125°C ±0.5°C +125°C à +350°C ±0,004.ltl	-40°C à +133°C ±1°C +133°C à +350°C ±0,0075.ltl	4,279	TX1 ±0.5°C Temp. Câble -25°C à +100°C	TX2 ±1°C Temp. Câble -25°C à +100°C	TC (1)	Cuivre **Cu**	Cuivre-Nickel T ou Advance* ou Constantan* **Cu-Ni**	18	490
J	Fer **Fe**	Cuivre-Nickel J ou Advance* ou Constantan* **Cu-Ni**	-40°C à +750°C	-40°C à +375°C ±1,5°C +375°C à +750°C ±0,004.ltl	-40°C à +333°C ±2.5°C -333°C à +750°C ±0.0075.ltl	5,269	JX1 ±1.5°C Temp. Câble -25°C à +200°C	JX2 ±2.5°C Temp. Câble -25°C à +200°C	JC (1)	Fer **Fe**	Cuivre-Nickel J ou Advance* ou Constantan* **Cu-Ni**	120	490
E	Nickel-Chrome ou Chromel* **Ni-Cr**	Cuivre-Nickel E ou Advance* ou Constantan* **Cu-Ni**	-200°C à +900°C	-40°C à +375°C +1.5°C +375°C à +800°C ±0.004.ltl	-40°C à +333°C ±2.5°C +333°C à +900°C ±0,0075.ltl	6,317	EX1 ±1.5°C Temp. Câble -25°C à +200°C	EX2 ±2,5°C Temp. Câble -25°C à +200°C	EC (1)	Nickel-Chrome ou Chromel* **Ni-Cr**	Cuivre-Nickel E ou Advance* ou Constantan* **Cu-Ni**	730	490
K	Nickel-Chrome ou Chromel* **Ni-Cr**	Nickel-allié ou Alumel* **Ni-Al**	-200°C à +1200°C	-40°C à +375°C ±1,5°C +375°C à +1000°C ±0,004.ltl	-40°C à +333°C ±2.5°C +333°C à +1200°C ±0,0075.ltl	4,096	KX1 ±1.5°C Temp. Câble -25°C à +200°C	KX2 ±2.5°C Temp. Câble -25°C à +200°C		Nickel-Chrome ou Chromel* **Ni-Cr**	Nickel-allié ou Alumel* **Ni-Al**	730	280
									KCA (DIN ou WC) ±2,5°C Temp. Câble 0°C à +150°C	Fer **Fe**	Cuivre-Nickel W ou Advance* ou Constantan* **Cu-Ni**	120	520
									KCB (NF et DIN) ±2,5°C Temp. Câble 0°C à -100°C	Cuivre **Cu**	Cuivre-Nickel V ou Advance* ou Constantan* **Cu-Ni**	18	490
N	Nickel-Chrome Silicium ou Nicrosil* **Ni-Cr-Si**	Nickel-Silicium ou Nisil* **Ni-Si**	-200°C à +1200°C	-40°C à +375°C ±1,5°C +375°C à +1000°C ±0,004.ltl	-40°C à +333°C ±2.5°C +333°C à +1200°C ±0.0075.ltl	2,774	NX1 ±1,5°C Temp. Câble -25°C à +200°C	NX2 ±1,5°C Temp. Câble -25°C à +200°C	NC ±2,5°C Temp. Câble 0°C à -150°C	Nickel-Chrome Silicium ou Nicrosil* **Ni-Cr-Si**	Nickel-Silicium ou Nisil* **Ni-Si**		
R	Platine 13% Rodium **Pt** **13% Rh**	Platine **Pt**	0°C à +1600°C	0°C à +1100°C ±1°C +1100°C à +1600°C ±[1+0,003 (ltl.1100)]°C	0°C à +600°C ±1.5°C -600°C à +1600°C ±0.0025.ltl	0,647			RCA ±2.5°C Temp. Câble 0°C à +100°C RCB ±5°C Temp. Câble 0°C à +200°C	Cuivre **Cu**	Cuivre-Nickel R ou Advance* ou Constantan* **Cu-Ni**	18	40
S	Platine 10% Rodium **Pt** **10% Rh**	Platine **Pt**	0°C à +1600°C	0°C à +1100°C ±1°C -1100°C à +1600°C ±[1-0,003 (ltl.1100)]°C	0°C à +600°C ±1.5°C -600°C à +1600°C ±0,0025.ltl	0,646			SCA ±2.5°C Temp. Câble 0°C à +100°C SCB ±5°C Temp. Câble 0°C à +200°C	Cuivre **Cu**	Cuivre-Nickel S ou Advance* ou Constantan* **Cu-Ni**	18	40
B	Platine 30% Rodium **Pt** **30% Rh**	Platine 6% Rodium **Pt** **6% Rh**	±600°C à +1700°C		+600°C à +1700°C ±0.0025.ltl	0,033			BC	Cuivre **Cu**	Cuivre **Cu**	18	100

* marques déposées • ltl = valeur absolue de la température • (1) Ces références n'existent plus en norme française, ni en norme IEC • (2) Câble d'extension : conducteurs en alliages identiques au thermocouple • (3) Câble de compensation : conducteurs en alliages de substitution ayant des propriétés thermoélectriques similaires au thermocouple

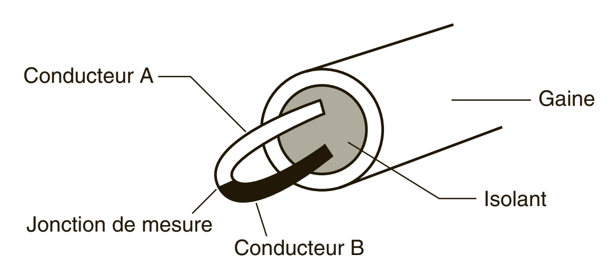


Figure 6.17 – Schéma de jonction de mesure

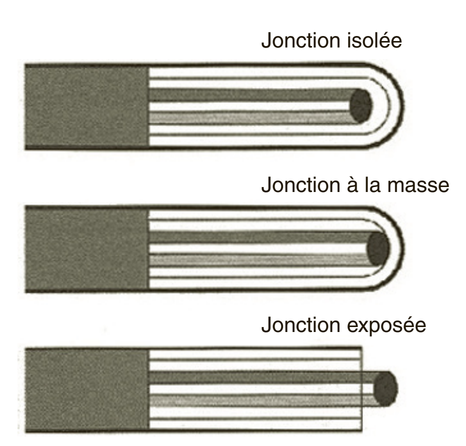


Figure 6.18 – Type de jonction de mesure

La jonction à la masse est à retenir en fonction du mode de mise à la terre des masses et des blindages de l'installation.
La jonction exposée est à utiliser pour un temps de réponse rapide et s'il n'y a pas de risque de corrosion.

Correction de soudure froide

L'un des inconvénient des thermocouples est qu'ils nécessitent une jonction de référence à une température donnée.
On peut disposer la soudure froide à la température ambiante ou dans un bain de glace fondante. Il reste ensuite à effectuer les corrections nécessaires par simple translation des résultats mais le dispositif à mettre en place n'est pas pratique à transporter sur un site industriel ni sur une installation de génie climatique…
Alors on préfère effectuer plus simplement une compensation électrique de soudure froide. Celle-ci est réalisée à l'intérieur même de l'appareil de mesure : on ajoute à la force électromagnétique mesurée celle résultant de la différence entre la température T1 à laquelle se trouve la soudure froide et 0 °C. On peut ainsi brancher directement le thermocouple ou le câble de compensation sans se préoccuper de la soudure froide.
Ce système de compensation est constitué d'un pont de Wheaston alimenté en courant continu et dont une des branches comporte une résistance variable en fonction de la température.
Il existe des boîtiers de compensation électrique de soudure froide pouvant être montés à l'extérieur de l'appareil et à proximité du thermocouple.

Constitution d'un thermocouple

Dans le domaine du génie climatique, nous rencontrons généralement :

– le couple thermoélectrique proprement dit, avec ses conducteurs différents et leur jonction ;
– les isolateurs électriques des fils ;
– un tube de protection en matière métallique devant assurer la protection mécanique et chimique du couple ;

– un système de raccord, ou fixation, maintenant l'ensemble, et de fait la soudure chaude, dans une position déterminée et pouvant comporter un dispositif d'étanchéité ;
– une tête de raccordement de l'appareillage de mesure pouvant être munie de connecteurs embrochables.

■ Les conducteurs de liaison

Il ne faut pas confondre les câbles d'extension et les câbles de compensation :
Les premiers sont des conducteurs en alliage identique au thermocouple et prolongeant celui-ci vers la jonction de référence, ce qui implique les mêmes tolérances de force électromotrice que celles des fils constitutifs du couple correspondant. Les câbles d'extension sont repérés par la lettre « X » placée après le code du couple thermoélectrique, par exemple « KX ».
Tandis que les seconds sont des conducteurs en alliage de substitution ayant des propriétés thermoélectriques similaires au thermocouple. Les câbles de compensation sont repérés par la lettre « C » après le couple thermoélectrique, par exemple « KC ».

Exemple de référence complète : IEC – K C B – 2

– IEC = code CEI.
– K = type de couple thermocouple (conducteur + en Nickel-Chrome/conducteur – en Nickel-Aluminium).
– CA = type de câble (compensation Cuivre-Nickel).
– 2 = classe de tolérance (dans l'exemple présent : ± 100 µV (± 2,5 °C) – voir tableau tab D.1-X ci-après).

Les matériaux des âmes conductrices sont déterminés à partir des types de couples thermoélectriques utilisés.

Tableau 6.8 – Matériaux des âmes conductrices des câbles d'extension et des câbles de compensation (code CEI/NF C 42-324)

Couples thermoélectriques et câbles d'extension			Câble de compensation		
Métaux	Symboles		Nature des âmes conductrices		
	Ther.	Exten.	Positif	Négatif	Symb.
Cuivre/Cuivre-Nickel T	T	TX	Cuivre	Cuivre-Nickel T	TC
Nickel-Chrome/Cuivre-Nickel E	E	EX	Nickel-Chrome	Cuivre-Nickel E	EC
Fer/Cuivre-Nickel J	J	JX	Fer	Cuivre-Nickel J	JC
Nickel-Chrome/Nickel-Aluminium	K	KX	Nickel-Chrome Cuivre	Nickel-Aluminium Cuivre-Nickel	KCA KCB
Platine rhodié (13 %)/Platine	R		Cuivre	Cuivre-Nickel R	RCA RCB
Platine rhodié (10 %)/Platine	S		Cuivre	Cuivre-Nickel S	SCA SCB
Platine rhodié (30 %)/Platine rhodié (6 %)	B		Cuivre	Cuivre allié (*)	BC
Nickel-Chrome-Silicium/Nickel-Silicium	N	NX	Nickel-Chrome-Silicium	Nickel-Silicium	NC

(*) Lorsque la liaison couple thermoélectrique/Câble de compensation reste à une température inférieure à 100 °C, il reste recommandé d'utiliser du cuivre pour l'âme du conducteur négatif.

Tableau 6.9 – Tolérance des câbles d'extension et des câbles de compensation

Type de câble		Classe de tolérance		Domaine de température du câble	Température de la jonction de mesure
		1	2		
Extension	JX	± 85 µV (± 1,5 °C)	± 140 µV (± 2,5 °C)	– 25 °C à + 200 °C	500 °C
	TX	± 30 µV (± 0,5 °C)	± 60 µV (± 1,0 °C)	– 25 °C à + 100 °C	300 °C
	EX	± 120 µV (± 1,5 °C)	± 200 µV (± 2,5 °C)	– 25 °C à + 200 °C	500 °C
	KX	± 60 µV (± 1,5 °C)	± 100 µV (± 2,5 °C)	– 25 °C à + 200 °C	900 °C
	NX	± 60 µV (± 1,5 °C)	± 100 µV (± 2,5 °C)	– 25 °C à + 200 °C	900 °C
Compensation	KCA	–	± 100 µV (± 2,5 °C)	0 °C à + 150 °C	900 °C
	KCB	–	± 100 µV (± 2,5 °C)	0 °C à + 100 °C	900 °C
	NC	–	± 100 µV (± 2,5 °C)	0 °C à + 150 °C	900 °C
	RCA	–	± 30 µV (± 2,5 °C)	0 °C à + 100 °C	1 000 °C
	RCB	–	± 60 µV (± 5,0 °C)	0 °C à + 200 °C	1 000 °C
	SCA	–	± 30 µV (± 2,5 °C)	0 °C à + 100 °C	1 000 °C
	SCB	–	± 60 µV (± 5,0 °C)	0 °C à + 200 °C	1 000 °C

La tolérance d'un câble d'extension ou de compensation est l'écart additionnel maximal exprimé en microvolts, dû à la présence de ce câble dans le circuit de mesure de la température.

Les valeurs entre parenthèses représentent la tolérance en degré Celsius correspondante à la température maximale de la jonction de mesure indiqué dans la dernière colonne. À des températures de jonctions inférieures, l'erreur en °C sera plus grande.

Lorsque les câbles de compensation et les câbles de compensation sont entourés d'une gaine de protection, un code couleur est à respecter selon la norme NF C 42-324 et tirés de la Publication 304 de la CEI :

Tableau 6.10 – Code couleur des câbles de compensation et d'extension

Type de couple thermoélectrique	Couleur des isolants des conducteurs positifs et des gaines	Couleur des isolants des conducteurs négatifs
T	brun	blanc
E	violet	
J	noir	
K	vert	
R	orange	
S	orange	
B	gris	
N	rose	

C

LES MESURES DE TEMPÉRATURE

Nota

Dans le cas de circuit de sécurité intrinsèque, la gaine doit être obligatoirement de couleur bleu clair.

Selon la température ambiante, les câbles de compensation et les câbles d'extension peuvent être utilisés avec différents matériaux d'isolation et de gainage.

Tableau 6.11 – Nature de l'isolant

Température ambiante	Nature de l'isolant
– 25 °C à + 90 °C	PVC, PE, PR
– 25 °C à + 250 °C	produits fluorés et silicone
> 250 °C	minérale

6.7.2 Principe de mesurage

Le principe de mesurage est identique au capteur Pt100 décrit ci-avant.

6.8 Le capteur à contact

Parmi les différents moyens d'estimation de la température d'un fluide, le mesurage à l'aide d'un capteur à contact est sans doute celui qui est le plus sujet à interprétation. Pas du fait de la qualité de ses composants, mais parce que l'élément sensible de la sonde se situe à l'interface entre le fluide et l'équilibre thermique qui se crée entre la température ambiante et la température du matériau support de la sonde.

De plus, si c'est la température du fluide qui est l'objet de la recherche, la nature de la conduite influe aussi sur la détermination de celle-ci.

Nous pouvons distinguer les capteurs amovibles de température de surface et les capteurs fixes de température de surface. Les premiers sont d'application manuelle sur la conduite et la même sonde est utilisée pour procéder à des mesurages successifs. Alors que les seconds sont fixés sur la canalisation par le biais d'un ruban adhésif, d'une bande type « Velcro » ou par un collier de serrage, avec généralement un complément d'isolation en partie supérieure pour limiter les phénomènes de refroidissement surfacique par convection. Cette méthode de l'estimation de la température est de fait « directe ».

Dans le domaine du génie climatique, ce moyen de mesurage est souvent utilisé pour estimer les températures de surface de canalisations (notamment d'eau glacée pour vérifier le point de rosée), en surface de gaine de traitement d'air, en surfaces d'un élément de chaudière ou de sa jaquette isolante…

Cette méthode de mesurage non intrusive est aussi utilisée lorsqu'il n'y a pas de doigt de gant pour placer une sonde à immersion dans les conduites dans le but d'estimer la température du fluide circulant. Cette méthode de l'estimation de la température du fluide est de fait indirecte. Nous verrons ci-après comment interpréter les résultats de mesurage dans ce cas-là.

Dans ces deux cas, la température mesurée est aussi sujette à interprétation compte tenu de l'influence de phénomènes physiques entachant la précision du résultat :

– la macroconstriction ; le fait de mettre en contact un élément sur une paroi crée des convergences de lignes de flux thermiques vers la zone de contact.

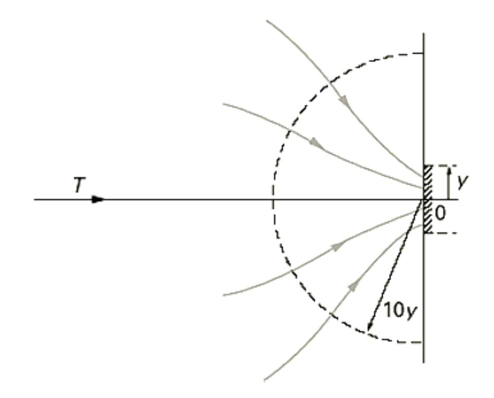


Figure 6.19 – Effet de macroconstriction (doc. T.I.)

– la rugosité du support ; l'irrégularité de la surface paroi/sonde créé une résistance thermique de contact.

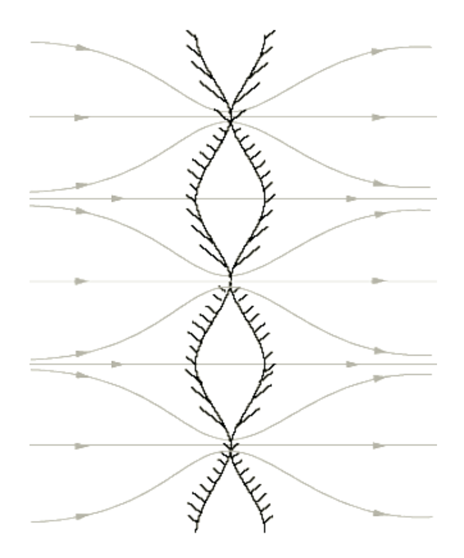


Figure 6.20 – Effet de rugosité de la paroi (doc. T.I.)

– l'effet d'ailette créé par le capteur. Le flux de chaleur est sensible à la forme d'ailette du capteur, aussi appelée « barre », compte tenu de la différence de température entre la surface de contact et la température extérieure. Ce transfert de flux dépend principalement de la forme de la géométrie, du coefficient de transfert superficiel et de la conductivité thermique.

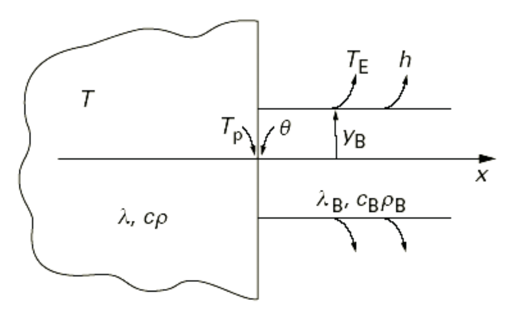


Figure 6.21 – Effet d'ailette (doc. T.I.)

C

LES MESURES DE TEMPÉRATURE

On peut résumer ces trois sources d'erreur sur un graphique :

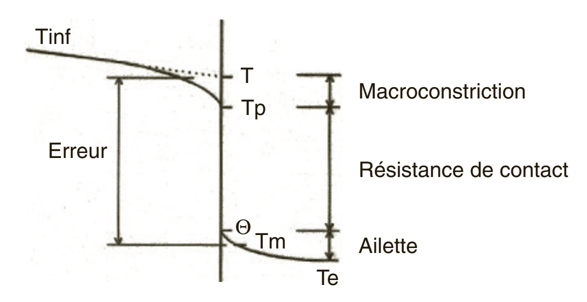


Figure 6.22 – Sources d'erreur des capteurs

avec :

T_{inf} = température dans le matériau.

T = température de surface du matériau (avant mise en place du capteur).

T_p = température due à la macroconstriction.

Θ = température du capteur à l'interface capteur/surface.

T_m = température au niveau de l 'élément sensible du capteur.

T_e = température ambiante.

Les fabricants de capteur amovible tiennent compte aussi de la pression que peut générer l'utilisateur en réalisant des sondes à ressort ou à ruban (voir figures 6.25 et 6.27 ci-après) pour éviter l'écrasement irréversible de l'élément sensible.

L'utilisation des capteurs de température à contact complète les moyens mis à la disposition du technicien avec le thermomètre optique à infrarouge exposé au chapitre précédent.

Nous n'évoquerons pas dans le présent ouvrage l'estimation de la température par utilisation de papier ou de peinture thermosensible qui ne sont pas des moyens de mesurage courants dans le domaine du génie climatique.

6.8.1 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement des capteurs à contact repose sur la variation de la résistance électrique d'éléments conducteurs de l'électricité (cf ci-avant le chapitre « le capteur à résistance type Pt100 ») ou suivant les effets thermoélectriques dans un circuit électrique constitué de deux conducteurs de type différent (cf ci-avant le chapitre « le thermocouple »).

Le lecteur pourra se reporter au chapitre correspondant pour plus de détails sur le fonctionnement selon le modèle de capteur utilisé. Nous exposerons ici les différences physiques permettant de les distinguer les uns des autres.

■ Capteur à résistance type Pt100

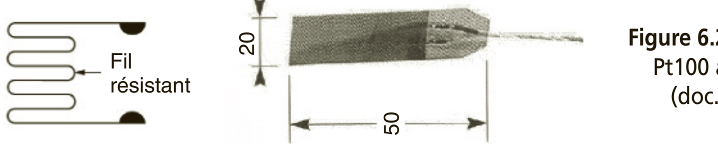


Figure 6.23 – Sondes Pt100 à contact (doc. KIMO)

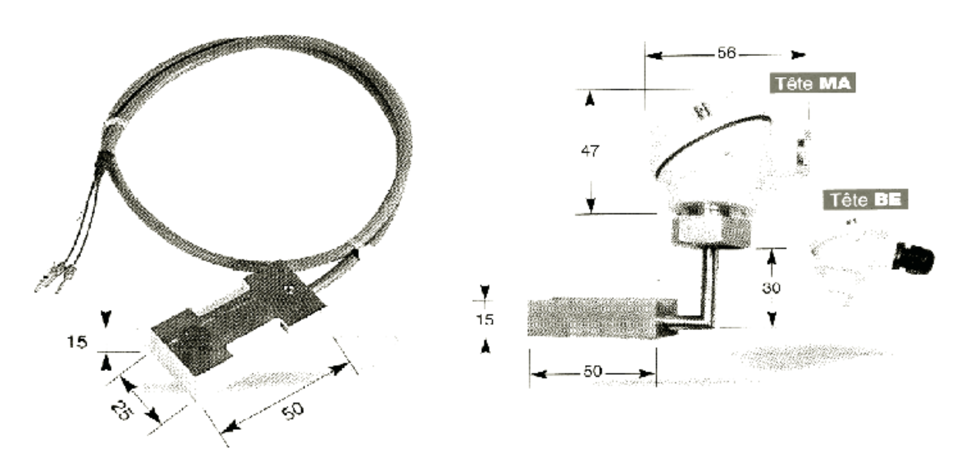


Figure 6.24 – Sondes Pt100 à contact pour tuyauteries (doc. KIMO)

■ Capteur à thermocouple

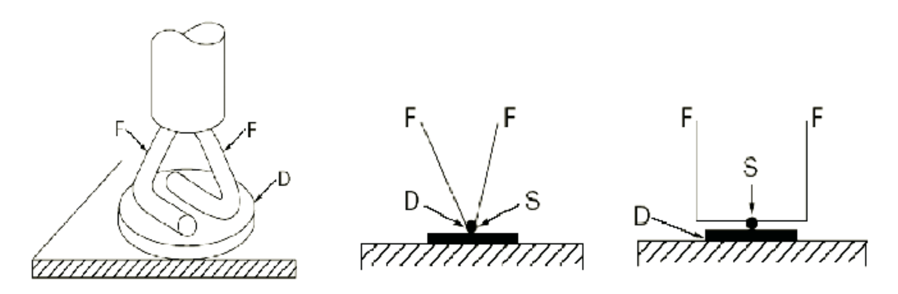


Figure 6.25 – Sondes thermocouple à contact pour tuyauteries (doc. T.I.).
F = fil du thermocouple ; D = disque de contact ; S = soudure

L'utilisation de pâte silicone thermo-conductrice est indispensable pour améliorer le mesurage.

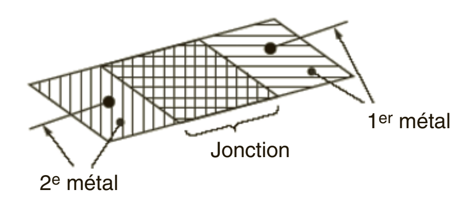


Figure 6.26 – Sonde thermocouple à contact en film (doc. T.I.)

6.8.2 Principe de la mesure

Les sources d'erreur étant assez importante, il convient de respecter quelques précautions lors de mesurage de température avec des sondes à contact.
En premier lieu, il faut utiliser des capteurs ayant une géométrie qui correspond à la surface mesurée. Lorsqu'il s'agit d'une canalisation, la courbure extérieure de

celle-ci nécessite une surface de sonde adaptée, soit par la forme intrinsèque de l'élément sensible, soit par sa faculté à se déformer pour s'appliquer le mieux possible sur le champ de mesure.

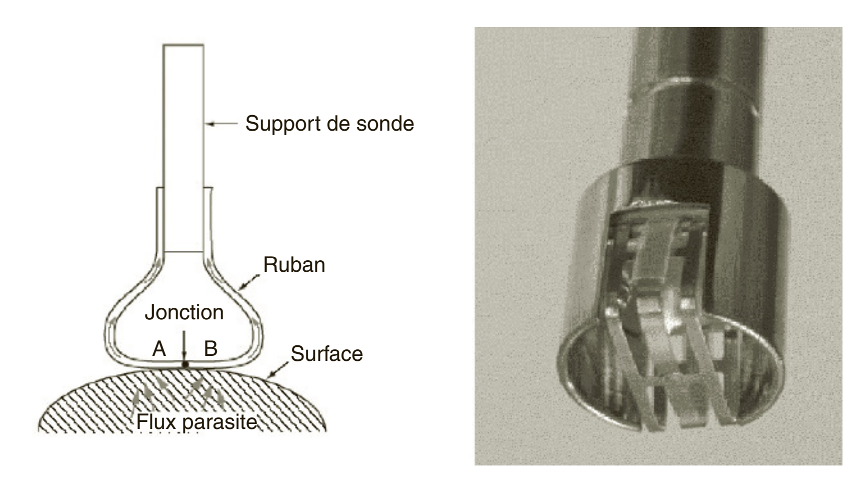


Figure 6.27 – Sondes thermocouple à contact pour tuyauteries (doc. T.I. et KIMO)

La qualité du système de fixation de la sonde à contact sur la tuyauterie, généralement par collier métallique (plus solide que les colliers en plastique mais sujet à la dilatation), ainsi que celle du scotch d'application dans le cas de sonde fixe en film est primordiale.

Il est aussi recommandé d'isoler thermiquement la sonde de son environnement extérieur afin de limiter les influences étrangères au mesurage telle que la convection et le rayonnement (voir figure 6.27).

Lorsque l'on souhaite estimer la température d'un fluide par un mesurage indirect, la température nominale du fluide peut être sous-estimée de plusieurs degrés par rapport à une sonde immergée.

Par exemple, pour une température nominale stabilisée à 80 °C, on peut obtenir les résultats suivants :

- avec une sonde thermocouple type K à fils soudés sur un support (Figure 6.25), l'écart est de 5 °C environ ;
- avec une sonde thermocouple type K à ressort anti-écrasement, l'écart est de 3 °C environ ;
- avec une sonde Pt100 (Figure 6.24), l'écart de température peut être de 2 °C ;
- avec une sonde Pt100 sur film, l'écart est de 1 à 2 °C environ ;
- avec une sonde thermocouple à ruban (Figure 6.27), l'écart pourrait être de 0,9 °C.

L'idéal pour utiliser les sondes à contact sur une paroi pour une estimation indirecte est évidemment de pouvoir corriger la température mesurée par un coefficient correspondant à un mesurage plus précis effectué avec une sonde immergée présente à proximité du point de mesurage. Si cela est réalisable sur le site, cette méthode

permet de déterminer le « décalage » entre la température du fluide et la température extérieure de la paroi de la canalisation.
Si les caractéristiques de la canalisation (nature, épaisseur et encrassement interne) sont les mêmes sur tout le réseau, ce coefficient correcteur peut être déterminé pour chaque régime de température.
Lorsque la température du fluide est variable, l'inertie de la sonde revêt aussi un caractère important, ainsi que sa protection vis-à-vis des conditions ambiantes extérieures. On privilégiera donc des sondes à contact type Pt100 par film protégé avec isolant thermique pour un mesurage fixe, ou une sonde thermocouple à contact à ruban ou type Pt100 pour un mesurage mobile.

6.9 Le thermomètre optique à infrarouge

Le thermomètre optique à infrarouge est d'usage courant dans le domaine du génie climatique car c'est le seul appareil de mesure qui ne nécessite pas de contact direct avec l'objet dont on veut connaître la température.
Il permet de :
– mesurer des températures de corps très élevées, voire supérieures à celles mesurables par un thermocouple (> 2 000 °C) ;
– mesurer la température de corps à faible conductivité thermique, tels que les matériaux isolants ;
– mesurer des températures de corps en mouvement, tels qu'un roulement de ventilateur par exemple ;
– mesurer des températures de corps qui ne peuvent pas l'être par contact direct, telles que des pièces conductrices dans une armoire électrique ;
– mesurer des températures de surface hors d'atteinte, tels que des plafonds rayonnants, des calorifugeages de tuyauteries ;
– mesurer des ponts thermiques sur de faibles surfaces ;
– avoir un temps de réponse très rapide (< 1 seconde lorsque l'appareil est à température ambiante).

6.9.1 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement des thermomètres optique à infrarouge repose sur trois phénomènes physiques distincts : d'abord, la longueur d'onde (le spectre) correspondante au rayonnement électromagnétique du corps dont on souhaite connaître la température, ensuite, l'émissivité de ce corps qui correspond à sa capacité à émettre un rayonnement infrarouge, et enfin, ce thermomètre utilise les lois de l'optique.

■ La longueur d'onde λ

Ce phénomène physique repose sur le fait que n'importe quel corps à une température supérieure au zéro absolue (0 K, soit – 273,15 °C) émet un rayonnement électromagnétique, plus communément appelé rayonnement thermique infrarouge, en fonction de sa température.
Le spectre du rayonnement infrarouge s'étend de 0,7 à 1 000 µm ($0{,}7.10^{-6}$ m à 1.10^{-3} m) de longueur d'onde λ (pour mémoire, 1 µm = 0,001 mm = 1.10^{-6} m).

C

LES MESURES DE TEMPÉRATURE

Cette plage est invisible par l'œil humain, contrairement à la bande de 380.10^{-9} m (couleur violette) à 750.19^{-9} m (couleur rouge) qui correspond à la lumière visible.
Dans le domaine courant de la thermique, on utilise surtout la plage située entre 0,7 et 20 µm car il s'agit d'une zone dans laquelle les différents gaz contenus dans l'air ont très peu d'influence sur le mesurage. A une distance d'un mètre environ, on peut considérer qu'il n'y a ni absorption ni émission par l'air ambiant.
Selon les plages de températures souhaitées, les constructeurs prévoient des équipements compatibles avec des « fenêtres atmosphériques ». par exemple, pour un même matériau, nous pourrions rencontrer :

- de 0,7 à 1,3 µm (env. 3 000 °C) ;
- de 1,4 à 1,8 µm (env. 1 800 °C) ;
- de 2 à 2,5 µm (env. 1 000 °C) ;
- de 3,2 à 4,3 µm (env. 500 °C) ;
- de 4,8 à 5,3 µm (env. 300 °C) ;
- de 8 à 14 µm (env. 200 °C).

On parle de mesure « monochromatique » car les appareils de mesures courants fonctionnent sur une seule bande d'ondes pour des raisons de coût de fabrication.
Il existe des instruments de mesure « bichromatique » couvrant deux gammes d'onde qui présentent l'avantage de ne pas être lié à la connaissance de l'émissivité, comme nous le verrons ci-après, mais qui sont d'un coût de production nettement plus élevés..
Dans le domaine du génie climatique, les constructeurs utilisent la fenêtre de 8 à 14 µm de la zone infrarouge, c'est à dire aux alentours de 1.10^{-5} m, qui correspond le mieux à la plage de rayonnement électromagnétique courante, et à la problématique de l'air ambiant exposé précédemment.
Pour d'autres domaines de la thermique comme celui des mesurages sur des fours industriels, il est recommandé d'utiliser des thermomètres à infrarouge ayant une longueur d'onde de 1 µm à 1,6 µm par exemple.

L'émissivité

Un corps qui reçoit un rayonnement électromagnétique peut en absorber une partie et réfléchir le reste. L'énergie absorbée est convertie en énergie thermique qui crée l'élévation de la température de ce corps.
On distingue :

- le facteur d'émissivité (ou coefficient d'émission) ε : capacité d'un corps à émettre un rayonnement infrarouge ;
- le facteur de réflexion R : capacité d'un corps à réfléchir un rayonnement infrarouge ;
- le facteur de transmission T : capacité d'un corps à laisser passer un rayonnement infrarouge.

De fait, la somme $\varepsilon + R + T = 1$ (ou 100 % selon l'expression).
On distingue alors les corps qui absorbent la totalité de l'énergie reçue, c'est ce que l'on appelle les « corps noirs parfaits ». Ils ont la propriété théorique, quelle que soit la longueur d'onde, d'absorber la totalité de l'énergie qu'il reçoit, et de transformer

ce rayonnement thermique pour l'émettre aussi en totalité. Un corps noir parfait n'a pas de réflexion.

Mais dans la nature nous environnant, le corps noir parfait n'existe pas et l'on introduit la notion d'« émissivité » pour caractériser les corps noirs réels. Le coefficient d'émission ε caractérise cette grandeur. Si l'émissivité ε d'un corps noir parfait est égal à 1, celui d'un corps noir réel est inférieur à 1.

$$\varepsilon = \frac{r_c}{r_0}$$

avec :

ε = coefficient d'émission.

r_c = rayonnement du corps réel, en W/m^2.

r_0 = rayonnement du corps noir parfait = 1 W/m^2.

Les thermomètres à infrarouge (IR) monochromatique ne mesure pas directement la température mais la luminance énergétique L_λ. Étant réglés pour une certaine longueur d'onde et pour une émissivité ε (souvent réglable), leur processeur interne permet de déterminer la température des corps (voir au paragraphe 6.8.1 pour le principe de fonctionnement).

Le rayonnement thermique d'un corps est appelé « émittance ». Elle correspond à la puissance totale rayonnée par unité de surface de l'émetteur, exprimée en W/m^2.

L'émittance thermique d'un corps varie en fonction de sa température. Elle n'est pas constante dans tout le spectre d'émission car elle dépend de la longueur d'onde λ.

La luminance énergétique, appelée aussi radiance, d'un corps correspond à l'émittance spectrale de puissance rayonnée par celui-ci dans un hémisphère, en fonction de sa température et de son émissivité pour une longueur d'onde donnée.

On la calcule d'après l'équation de Planck :

$$L_\lambda = \varepsilon \frac{C_1}{\lambda^5\left(\exp \frac{C_2}{\lambda T} - 1\right)}$$

avec :

L_λ = luminance énergétique, en $W.sr^{-1}.m^{-2}$.

ε = coefficient d'émissivité.

λ = longueur d'onde, en m.

T = température du corps, en K.

C_1 = constante = $3{,}742.10^{-16}$.

C_2 = constante = $1{,}438.10^{-2}$.

Les mesures de températures effectuées avec les thermomètres infrarouges sont basées sur cette équation de Planck.

La plupart des corps non métalliques opaques ont un coefficient ε situé entre 0,85 et 0,90.

Les corps métalliques tels que les gaines de climatisation en acier galvanisé ont un coefficient d'émission ε relativement faible, situé entre 0,2 et 0,4, en raison de la réflexion des couches extérieures de zinc, voire inférieure à 0,1 lorsque la gaine est décapée (par exemple pour les gaines laissées apparentes). Dans ce cas, il vaut mieux éviter de faire des mesurages par infrarouge.

Dans le cas des matériaux organiques comme le papier, les matières plastiques, le caoutchouc, le bois, les textiles, les minéraux, l'amiante, l'asphalte, la céramique…, le facteur d'émissivité est de l'ordre de 0,95.
C'est la valeur pré-réglée par la plupart des constructeurs car elle correspond à beaucoup de matériaux dans l'activité du génie climatique, mais elle peut-être modifiée par l'opérateur sur les appareils de bonne qualité en fonction d'émissivité connue.
La glace et le calcaire pouvant atteindre la valeur de 0,98.
Se reporter au chapitre 8.2 pour la valeur de l'émissivité de certains matériaux en fonction de leur température.
Pour mémoire, il n'est pas possible de procéder à des mesurages à travers une vitre ni sur bulles d'air.
En l'absence de valeur connue de ε, on doit d'abord « étalonner » le thermomètre à IR, si cela est réalisable, d'après un mesurage réalisé à l'aide d'un thermomètre à contact et régler le coefficient d'émissivité qui permet d'obtenir la même température.
Une solution pratique en présence de matériau réfléchissant consiste à recouvrir la zone de mesure par de la couleur noir mate, type noir de fumée, ou par du ruban adhésif à émissivité connue fournie par le fabricant.
Compte tenu de ce qui précède, on comprend qu'il convient de s'assurer de la valeur de réglage du coefficient d'émission ε et du domaine spectrale (la gamme d'onde λ) de son thermomètre à infrarouge avant de procéder au mesurage.
Les thermomètres IR bichromatiques sont fabriqués pour deux longueurs d'onde distinctes λ_1 et λ_2 et ne nécessitent pas de paramétrer l'émissivité du corps.
Leur technicité reposent sur la propriété physique relative aux luminances mesurées $L_{\lambda 1}$ et $L_{\lambda 2}$ dont le rapport est directement proportionnel à la température. De fait, la connaissance des émissivités ε_1 et ε_2 devient inutile.
C'est un avantage au niveau de la précision du mesurage mais le coût de fabrication est quasiment multiplié par deux par rapport à un thermomètre monochromatique car il y a deux systèmes de mesures de la luminance qui fonctionnent en parallèle.

■ Les lois de l'optique

L'avantage du rayonnement infrarouge est qu'il respecte les lois de l'optique, notamment lorsque l'on souhaite le dévier, le réfléchir ou le concentrer à l'aide de lentille(s).
Le système optique du thermomètre IR intercepte la luminance énergétique rayonnée par la zone de mesure circulaire appelée « spot ». L'énergie reçue sur le détecteur est amplifiée électroniquement et convertie en signal électrique.
La température du corps à mesurer étant différente de la température du thermomètre IR, le processeur interne devra faire une correction du signal reçu pour en tenir compte.
Si l'on considère le signal Sc provenant du corps dont on souhaite connaître la température, et St le signal correspondant à la température du thermomètre (considéré à la température ambiante), la température réelle du corps sera fonction du signal efficace Se qui sera déterminé en interne par :

$$Se = \frac{Sc - St}{\varepsilon} + St$$

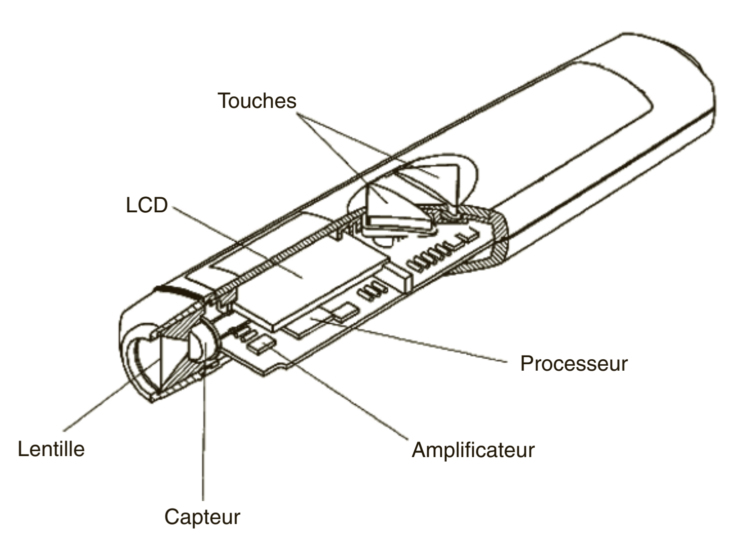


Figure 6.28 – Coupe transversale d'un thermomètre à infrarouge (doc. TESTO)

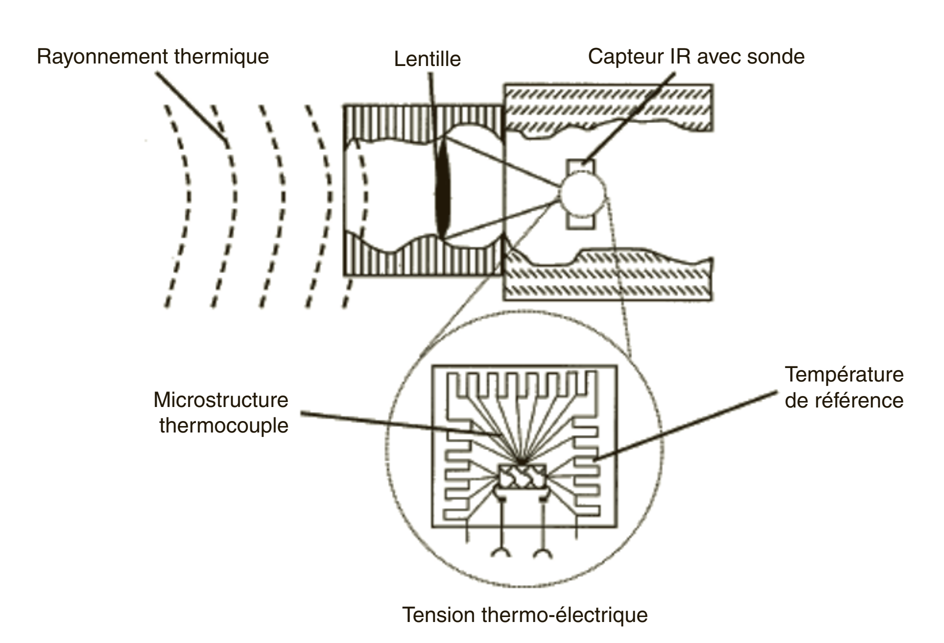


Figure 6.29 – Principe de fonctionnement du capteur IR (doc. TESTO)

Afin de minimiser cette source d'erreur, il convient de respecter le temps de mise en température du thermomètre IR prescrit par son fabricant, qui peut être de l'ordre de 15 minutes. Il existe des thermomètres avec des températures ambiantes réglables. Leur surcoût relatif est à étudier en fonction de l'intérêt que représente cette fonction.

Une fois en température, les mesurages peuvent être réalisés et le temps de réponse de la plupart des thermomètres IR est de l'ordre de quelques dixièmes de seconde.

6.9.2 Principe de mesurage

La précision du mesurage réalisé avec un thermomètre à IR dépend de la zone de mesure (champ de vision égal à la base d'un cône appelé spot) qu'il émet par rapport à la surface du corps dont on veut connaître la température. Le spot doit toujours couvrir la zone d'influence. Il faut absolument éviter de trop s'éloigner du point de mesure afin de ne pas être influencé la température des objets environnants. Il ne faut pas confondre le pointeur laser qui représente seulement le centre du spot avec le diamètre du disque correspondant à ce spot.

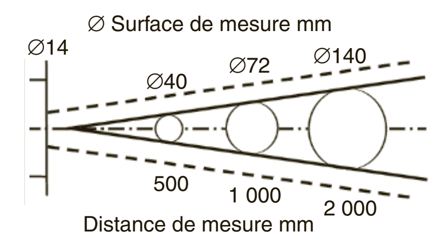


Figure 6.30 – Exemple de cône et de spots de mesure (doc. TESTO)

Les thermomètres IR sont conçus pour émettre un cône simple ou un cône double. Le choix de l'appareil dépend de la distance à laquelle se situe de manière privilégiée le corps.

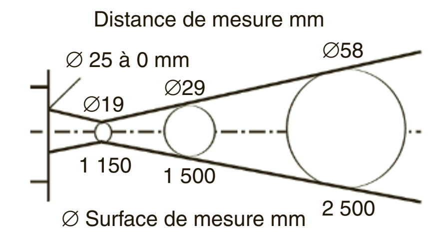


Figure 6.31 – Exemple de deux cônes et de spots de mesure (doc. TESTO)

Sur les deux figures précédentes, on remarque que les dimensions des zones de mesure représentées par les spots sont des critères de choix important si l'on veut que la surface couverte soit inférieure à la surface de la cible, et ainsi limiter les erreurs de mesure. Cette dimension dépend de la résolution optique.

La résolution optique se déduit du rapport entre la distance de mesure D et la dimension Ø du spot.

Par exemple, dans la première figure, le rapport D/Ø est de 12 :1 correspondant au rapport 500/40. À chaque mètre d'éloignement par rapport à la cible, le diamètre du spot augmente au risque de dépasser la dimension du corps dont on veut connaître la température.

Dans la seconde figure avec deux cônes de mesure, le rapport D/Ø en zone proche est de 60 :1 correspondant au rapport 1 150/19, et en zone éloignée, le rapport est de 50 :1 correspondant au rapport 1 500/29.

Tableau 6.12 – Éloignement et diamètre du spot (rapport D/Ø est de 12 :1)

Distance (mm)	Diamètre du spot (mm)
500	40
1 000	80 (72)
1 500	120
2 000	160 (140)
2 500	200
3 000	240
3 500	280
4 000	320

Tableau 6.13 – Éloignement et diamètre du spot (rapport D/Ø 60 :1 et 50 :1)

Distance (mm)	Diamètre du spot (mm)
0	25
1 000	17
1 150	19
1500	30 (29)
2000	40
2500	50 (58)
3000	60
3500	70
4000	80

En conclusion, plus le rapport D/Ø est faible, plus la taille du spot augmente rapidement.

Par conséquent, si l'appareil de mesure doit être utilisé pour des mesurages sur de grandes distances, il y aura lieu de veiller à choisir un rapport D/Ø relativement élevé afin que le champ de vision ne dépasse pas la surface ciblée.

La mesure par infrarouge étant un procédé basé sur l'optique, il faut veiller à ce que la lentille soit toujours propre et ne soit pas embuée (appareil froid dans une atmosphère chaude et humide par exemple).

Il faut éviter d'effectuer des mesurages de températures sur des matériaux à facteur d'émissivité inférieur à 0,2 s'il n'est pas possible de mettre en place une bande d'émission connue.

La précision des thermomètres à infrarouge est de ± 1 °C à ± 1,5 °C pour des matériels de milieu de gamme.

7 • LES MÉTHODES DE MESURAGE

7.1 Température dans une conduite

■ Exploration du champ de température

Placée dans une canalisation hydraulique, la sonde doit être parfaitement irriguée et l'élément sensible placé dans un endroit où la température du fluide est représentative. On la place généralement dans l'axe de la conduite pour limiter le rayonnement de la paroi extérieure ou dans un coude pour bénéficier des turbulences et ainsi mesurer une température moyenne représentative (voir figure 7.1 ci-après).

7.2 Température dans une gaine rectangulaire

■ Exploration du champ de température

Dans le domaine du génie climatique, la recherche de la « valeur vraie » de la température de l'air fait l'objet des mêmes méthodes que pour la mesure de la vitesse.

Dans le cas de gaines de grandes dimensions, il y a lieu d'explorer le champ de température dans les mêmes conditions que celles exposées au chapitre 2 de la partie « Aéraulique », en décomposant la surface en autant de points de mesurage que nécessaire selon la précision souhaitée.

Par contre, en toute rigueur, il serait erroné de faire la moyenne arithmétique des températures en croyant obtenir la température moyenne. En effet, il convient de s'intéresser à la puissance thermique véhiculée en pondérant la température relevée à chaque point de la section par la vitesse correspondante :

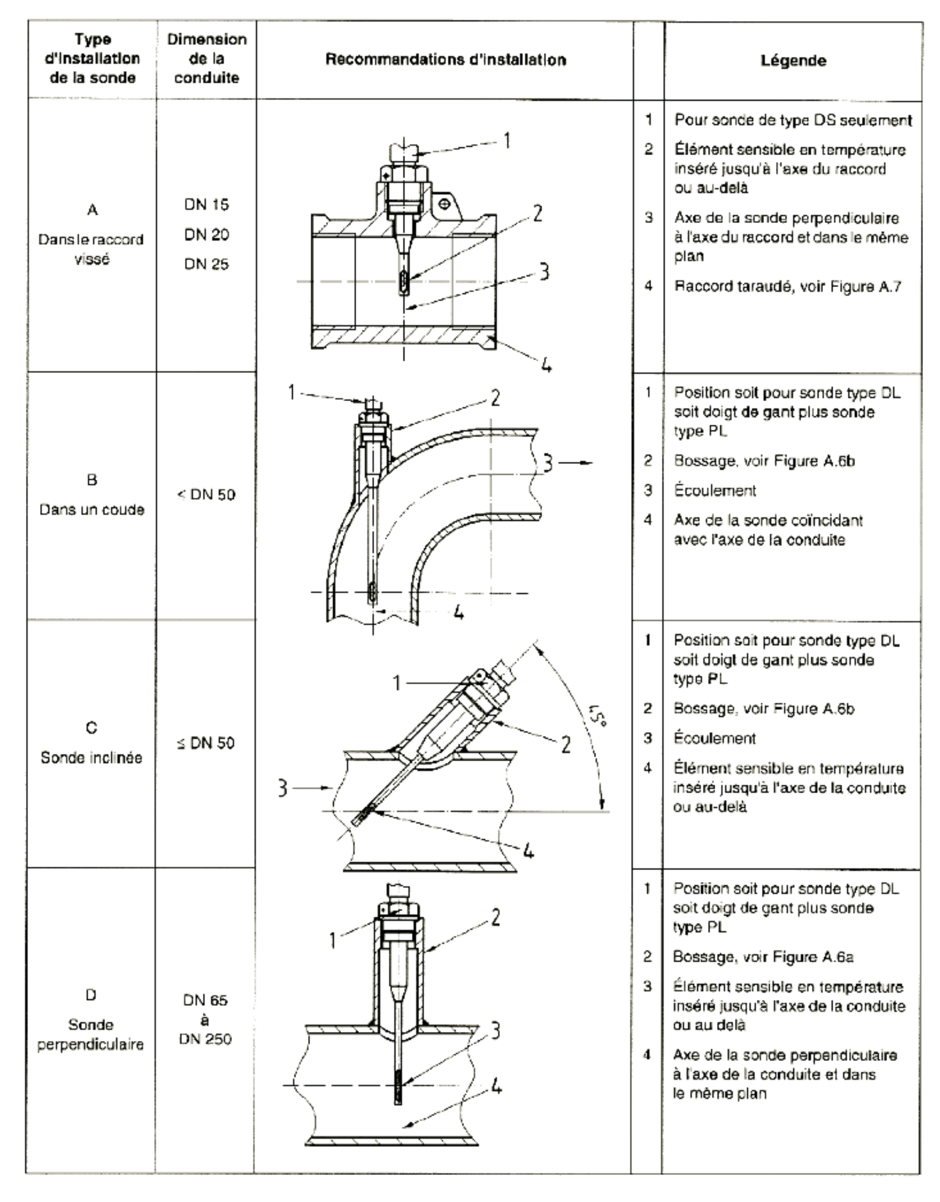
$$\frac{1}{t_m} = \frac{\frac{v_1}{t_1} + \frac{v_2}{t_2} + \ldots + \frac{v_n}{t_n}}{\Sigma v}$$

avec :

t_m = température moyenne.

v_n = vitesse de l'air mesurée au point *n*.

t_n = température de l'air mesurée au point *n*.



Type d'installation de la sonde	Dimension de la conduite	Recommandations d'installation		Légende
A Dans le raccord vissé	DN 15 DN 20 DN 25		1 2 3 4	Pour sonde de type DS seulement Élément sensible en température inséré jusqu'à l'axe du raccord ou au-delà Axe de la sonde perpendiculaire à l'axe du raccord et dans le même plan Raccord taraudé, voir Figure A.7
B Dans un coude	< DN 50		1 2 3 4	Position soit pour sonde type DL soit doigt de gant plus sonde type PL Bossage, voir Figure A.6b Écoulement Axe de la sonde coïncidant avec l'axe de la conduite
C Sonde inclinée	≤ DN 50		1 2 3 4	Position soit pour sonde type DL soit doigt de gant plus sonde type PL Bossage, voir Figure A.6b Écoulement Élément sensible en température inséré jusqu'à l'axe de la conduite ou au-delà
D Sonde perpendiculaire	DN 65 à DN 250		1 2 3 4	Position soit pour sonde type DL soit doigt de gant plus sonde type PL Bossage, voir Figure A.6a Élément sensible en température inséré jusqu'à l'axe de la conduite ou au delà Axe de la sonde perpendiculaire à l'axe de la conduite et dans le même plan

Figure 7.1 – Recommandations d'installation de sondes de température (doc. AFNOR)

Par exemple, une campagne de mesures a donné les résultats suivants :

Point de mesure	Vitesse (m/s)	Température (°C)
1	2	25
2	2,2	27
3	2,5	22
4	2,1	23

$$\frac{1}{t_m} = \frac{\frac{2}{25} + \frac{2,2}{27} + \frac{2,5}{22} + \frac{2,1}{23}}{2 + 2,2 + 2,5 + 2,1} = \frac{0{,}366}{8{,}8} = 0{,}041\,6$$

t_m = **24,04 °C** et non 24,25 °C en faisant la simple moyenne arithmétique des températures.

Le résultat n'est pas très différent dans ce cas-là mais il pourrait important si les températures et les vitesses étaient moins homogènes.

Cette méthode de calcul est à respecter si c'est la puissance thermique d'une batterie par exemple que l'on cherche à définir.

Dans le cas de gaine de côté inférieur ou égal à 125 mm, l'expérience montre qu'une sonde de température placée juste après obstacle (coude à 90° , té, réduction…) bénéficie de telles turbulences que la température du flux est homogène. Dans ce cas, on peut se dispenser d'explorer le champ de température et se contenter d'un seul mesurage au centre de la veine d'air.

7.3 Température dans une gaine circulaire

■ Exploration du champ de température

Idem aux gaines rectangulaires, y compris pour le cas des gaines de diamètre inférieur ou égal à 125 mm.

7.4 Température de l'air ambiant d'un local

■ Caractéristiques des appareils de mesure

Dans le cadre du mesurage de la température de l'air ambiant d'un local, les caractéristiques des appareils de mesure sont indiquées dans la norme NF EN ISO 7726 (voir tab. 7.1).

La classe C correspond à une ambiance modérée proche du confort.

La classe S correspond à une ambiance de contrainte thermique plus contraignante, voire extrême.

La vitesse locale de l'air au point de mesurage a une influence importante sur la grandeur mesurée en fonction du diamètre du capteur. Le graphe suivant (figure 7.2) indique la proportion entre la part de température de rayonnement et la part due à la vitesse de l'air sur le capteur.

La température mesurée s'exprime par :

$$t_a = (X.t_a) + (1- X).t_r$$

avec :

t_a = température ambiante.

t_r = température de rayonnement sur le capteur.

X = part relative en fonction de la vitesse de l'air sur le capteur.

Exemple

Avec une vitesse de 0,15 m/s sur un capteur d'1 mm de diamètre, la température du capteur sera de $(0{,}83.t_a) + (0{,}15.t_r)$.

Il faut un certain temps au capteur pour atteindre la température de l'air ambiant. Pour tenir compte de cette inertie, il faut attendre au moins 1,5 fois le temps de réponse à 90 % de la sonde. Cette inertie dépend de la taille et de la chaleur spécifique de l 'élément sensible.

Tableau 7.1 – Caractéristiques des appareils de mesure (doc. AFNOR)

Grandeur	Symbole	Classe C (confort)			Classe S (contrainte thermique)			Observations
		Gamme de mesure	Précision	Temps de réponse (à 90 %)	Gamme de mesure	Précision	Temps de réponse (à 90 %)	
Température de l'air	t_a	de 10 °C à 40 °C	Spécifiée : ±0,5 0 °C Souhaitable : ± 0,2 0 °C Ces précisions doivent être garanties au moins pour un écart $\|t_t - t_a\|$ égal à 10 °C	Le plus faible possible. Valeur à préciser comme caractéristique de l'appareil de mesure.	de – 40 °C à +120 °C	Spécifiée : – 40 °C à 0 °C : $\pm(0{,}5 + 0{,}01\,\|t_a\|)$ °C > 0 °C à 50 °C : ± 0,5 °C > 50 °C à 120 °C : $\pm[0{,}5 + 0{,}04\,(t_a - 50)]$°C Souhaitable : $\frac{\text{précision spécifiée}}{2}$ Ces niveaux doivent être garantis au moins pour un écart égal à 20 °C.	Le plus court possible. Valeur à préciser commme caractéristique de l'appareil de mesure.	Le capteur de température de l'air doit être protégé efficacement contre l'influence éventuelle du rayonnement thermique issu des parois chaudes ou froides. Une indication de la valeur moyenne sur une période d'une minute est de plus souhaitable.

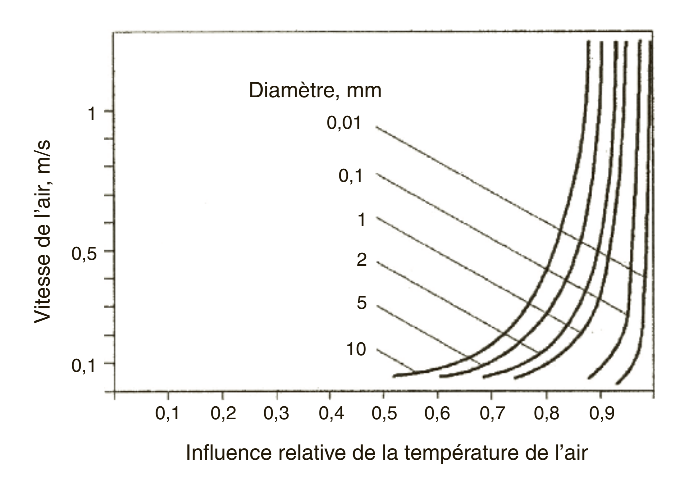


Figure 7.2 – Influence relative de la vitesse de l'air en fonction du diamètre du capteur (doc. AFNOR)

7.5 Température ambiante dans un local

Nous avons tous remarqué que la température ressentie dans un local dépend fortement de la distance à laquelle nous nous trouvons des parois. En hiver, la situation d'un poste de travail proche d'une paroi extérieure peut engendrer une sensation de froid pour l'occupant qui ne serait pas perçue un mètre plus à l'intérieur du bureau.

La difficulté pour « mesurer » cette température est assez simple à comprendre mais beaucoup se contentent toujours de placer un thermomètre à 1,50 du sol et de lire les graduations…

■ Exploration de l'espace

En matière de confort intérieur, les grandeurs physiques perceptibles caractérisent une à une les conditions environnementales de satisfaction. On peut citer principalement :

– la température de l'air ;
– l'humidité de l'air ;
– la vitesse de l'air ;
– la température moyenne de rayonnement.

La température de l'air, vue au paragraphe précédent, contribue à la sensation de confort.

L'humidité de l'air est exposé au chapitre E « Hygrométrie ».

Par expérience, une vitesse d'air supérieure à 0,20 m/s au niveau du visage donne un sentiment de fraîcheur. Cela provient de la convection qui s'accélère au niveau de la peau et qui fait s'évaporer plus rapidement les gouttelettes d'eau en surface. L'énergie de l'air absorbe la chaleur superficielle du corps.

Ce phénomène est ressenti à chaque fois que le corps mouillé est exposé à un courant d'air, par exemple en sortant de la douche ou d'une piscine.

Cette vitesse d'air influe aussi sur le mesurage de la température ambiante comme nous le verrons ci-après.

Ce n'est pas la température ambiante proprement dite que nous cherchons à connaître mais plutôt la température moyenne de rayonnement qui dépend de la température des murs environnants, des dimensions de ces murs et de leur emplacement par rapport à l'individu à son poste de travail. C'est le phénomène de parois froides perçu quelques fois à proximité d'une baie vitrée en hiver.

La différence entre l'une et l'autre provient du moyen de mesurage : la température ambiante est souvent assimilée à la température de l'air, alors que la température de rayonnement prend en considération les températures et la forme des parois environnantes et est beaucoup plus complexe à déterminer.

Dans le domaine du génie climatique, nous disposons de deux moyens pour mesurer la température moyenne de rayonnement :

les méthodes mathématiques ; calcul à partir de l'influence de la température des surfaces environnantes ou calcul à partir de l'influence de la température plane de rayonnement ;

utilisation d'un appareil de mesure ; le thermomètre à globe noir

□ Méthodes mathématiques

Succinctement, la première méthode mathématique est basée sur la température de surface de rayonnement T des surfaces environnantes et sur le facteur de forme $F_{p\text{-}N}$ de ces surfaces tenant compte de leur surface, de leurs dimensions et de leur position relative par rapport l'individu.

Se reporter au chapitre 8.3 pour une description sommaire car cette méthode s'écarte du sujet de cet ouvrage consacré à la métrologie du génie climatique.

De même pour la deuxième méthode mathématique qui est basée sur le calcul de la température plane de rayonnement t_{pr}, dans six directions en fonction de facteurs de forme, et sur le facteur d'aire projetée par une personne dans les six mêmes directions (haut, bas, gauche, droite, devant et derrière). Le corps humain étant alors assimilé à six surfaces projetées en fonction de sa position.

□ Méthode par mesurage

Pour ce qui concerne la métrologie en génie climatique, l'appareil de mesure généralement utilisé pour connaître la température moyenne de rayonnement est le thermomètre à globe noir, autrement appelée « boule noire » (voir figure 7.3). Cet équipement très courant permet de s'affranchir de l'ensemble des calculs mathématiques exposés brièvement en annexe.

Le thermomètre à globe noir se compose d'un capteur de température (sonde à résistance, thermocouple…) entouré d'une sphère noire (voir figure 7.3). Le globe est noirci par revêtement électrochimique ou par une peinture noir mate.

Le diamètre de la sphère préconisé est de 0,15 m, mais d'autres dimensions existent. Plus le diamètre sera petit, plus l'influence de la vitesse d'air sera importante, plus cela pénalisera la précision du mesurage (Figure 7.4).

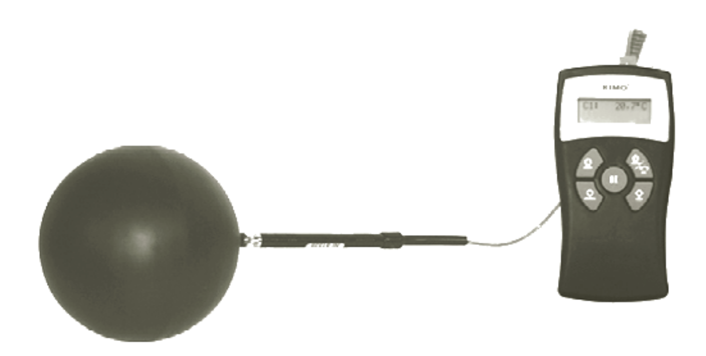


Figure 7.3 – thermomètre à boule noire avec sonde Pt100 (doc. KIMO)

La température externe moyenne du globe est pratiquement égale à la température intérieure perçue par le capteur en raison de la faible épaisseur de la paroi. On assimile l'une et l'autre à la même valeur (cf. NF EN ISO 7226).

Le globe noir doit être placé à l'endroit où l'on désire connaître la température moyenne de rayonnement. Il tend vers une température d'équilibre sous l'influence concomitante des échanges dus au rayonnement issus des différentes sources de chaleur du local et sous l'influence des échanges par convection. Une durée de 20 à 30 minutes est à prévoir pour atteindre cet équilibre en fonction des caractéristiques physiques de l'appareil de mesures et des conditions environnantes.

Le bilan des échanges thermiques entre le globe et l'ambiance est donné par l'équation :

$$q_r + q_c = 0$$

où :

$$q_r = \varepsilon_g.\sigma.(\overline{T_r^4} - T_g^4)$$ = les échanges de chaleur par rayonnement entre les parois du local et le globe, en W.m².

avec :

ε_g = l'émissivité du globe noir.

σ = la constante de Stephan-Boltzman, $5{,}67.10^8$ W.m^{-2}.K^{-4}.

$\overline{T_r}$ = la température moyenne de rayonnement.

T_g = la température du globe noir, en kelvins.

$$q_c = h_{cg}(T_a - T_g)$$ = les échanges de chaleur par convection entre l'air ambiant et le globe, en W.m².

avec :

h_{cg} = le coefficient de transfert thermique par convection au niveau du globe, en W.m^{-2}.K^{-1}.

T_a = la température ambiante, en kelvins.

T_g = la température du globe noir, en kelvins.

En convection naturelle, $h_{cg} = 1{,}4\left(\frac{\Delta T}{D}\right)^{1/4}$

En convection forcée, $h_{cg} = 6{,}3\dfrac{v_a^{0,6}}{D^{0,4}}$

avec :
$\Delta T = T_g - T_a$.
D = le diamètre du globe.
v_a = la vitesse de l'air au niveau du globe, en m/s.
Le bilan thermique du globe s'écrit donc :

$$\varepsilon_g.\sigma.(\overline{T}_r^4 - T_g^4) = h_{cg}(T_a - T_g) = 0$$

D'où la température moyenne de rayonnement :

$$\overline{T}_r = [T_g^4 + \frac{h_{cg}}{\varepsilon_g \sigma}(T_g - T_a)]^{1/4}$$

En convection naturelle, l'équation devient :

$$\bar{t}_r = \left[(t_g + 273)^4 + \frac{0{,}25.10^8}{\varepsilon_g}\left(\left(\frac{|t_g - t_a|}{D}\right)^{1/4} \cdot (t_g - t_a)\right)\right]^{1/4} - 273$$

Avec un globe de diamètre D de 15 cm et une émissivité de 0,95, l'équation devient :

$$\bar{t}_r = [(t_g + 273)^4 + 0{,}4.10^8(|t_g - t_a|^{1/4} \cdot (t_g - t_a))]^{1/4} - 273$$

En convection forcée, l'équation devient :

$$\bar{t}_r = \left[(t_g + 273)^4 + \frac{1{,}1.10^8.v_a^{0,6}}{\varepsilon_g.D^{0,4}}(t_g - t_a)\right]^{1/4} - 273$$

Avec le même globe que ci-dessus, l'équation devient :

$$\bar{t}_r = [(t_g + 273)^4 + 2{,}5.10^8.v_a^{0,6}.(t_g - t_a)]^{1/4} - 273$$

Comme pour la mesure de la température de l'air, la dimension de la boule noire influe sur le résultat. La figure 7.4 permet de déterminer la part relative de la température de l'air et de la température moyenne de rayonnement.

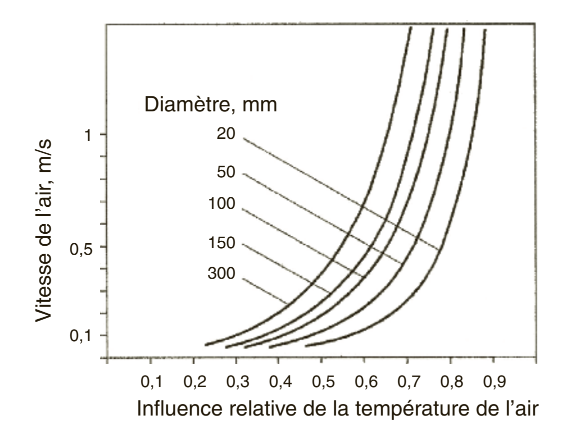


Figure 7.4 – Influence relative de la vitesse de l'air en fonction du diamètre du globe noir (doc. AFNOR)

C

LES MESURES DE TEMPÉRATURE

Par exemple, avec les mesures suivantes :
– $T_g = 55$ °C.
– $T_a = 30$ °C.
– $v_a = 0{,}3$ m/s.
Calcul du coefficient de transfert thermique h_{cg} en convection naturelle :

$$h_{cg} = 1{,}4\left(\frac{\Delta T}{D}\right)^{1/4} = 1{,}4\left(\frac{55-30}{0{,}15}\right) = 5\,\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$$

Calcul du coefficient de transfert thermique h_{cg} en convection forcée :

$$h_{cg} = 6,3\frac{v_a^{0,6}}{D^{0,4}} = 6{,}3\frac{0,3^{0,6}}{0,15^{0,4}} = 6{,}5\,\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$$

On retiendra donc l'équation en convection forcée pour calculer la température moyenne de rayonnement :

$$\bar{t}_r = [(55+273)^4 + 2{,}5.10^8.v_a^{0,6}(55-30)]^{1/4} - 273 = 74{,}7\ °\text{C}$$

Dans une ambiance hétérogène, il est important de considérer la hauteur de positionnement de la boule noire comme un paramètre important. Le ressenti d'un individu sera différent en fonction de la distance par rapport au sol. Dans ce but, la norme NF EN ISO 7726 donne à titre indicatif les hauteurs à considérer ainsi que les coefficients de pondération à appliquer pour le calcul de valeurs moyennes (tableau 7.2).

Tableau 7.2 – Hauteurs de mesure et coefficient de pondération (doc. AFNOR)

Postition des capteurs	Coefficients de pondération des mesures pour le calcul des valeurs moyennes				Hauteur recommandée (seulement à titre indicatif)	
	Ambiance homogène		Ambiance hétérogène		Assis	Debout
	Classe C	Classe S	Classe C	Classe S		
Niveau tête			1	1	1,1 m	1,7 m
Niveau abdomen	1	1	1	2	0,6 m	1,1 m
Niveau chevilles			1	1	0,1 m	0,1 m

Par exemple, si des mesures effectuées au niveau de la tête, de l'abdomen et au niveau des chevilles ont donné respectivement les valeurs suivantes :
– $\bar{t}_{rt} = 25$ °C.
– $\bar{t}_{ra} = 50$ °C.
– $\bar{t}_{rc} = 40$ °C.
La température moyenne de rayonnement sera de :

$$\bar{t}_r = \frac{(1.25)+(2.50)+(1.40)}{4} = 41\ °\text{C}$$

On remarque qu'une seule mesure effectuée au niveau de l'abdomen aurait été optimiste de 9 °C.

8 • ANNEXES

8.1 Relation température/résistance d'une résistance Pt100

Rappel : les relations températures/résistance pour résistance de platine de résistance nominale 100 Ω s'expriment selon les gammes de températures.

Entre –200 °C et 0 °C :

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t - 100\ °C)t^3].$$

Entre 0 °C et 850 °C :

$$R_t = R_0\ (1 + At + Bt^2).$$

avec :

R_t est la résistance à la température t.

R_0 est la résistance à $t = 0$ °C.

A = constante = 3,908 3.10^{-3} °C^{-1}.

B = constante = – 5,775.10^{-3} °C^{-1}.

C = constante = – 4,183.10^{-3} °C^{-1}.

Les tableaux suivant donnent directement les valeurs des résistances entre – 200 °C et + 850 °C d'une résistance de platine de résistance nominale R_0= 100 Ω.

Nota

Pour les autres valeurs nominales telles que 10 Ω, 500 Ω ou 1 000 Ω, le tableau peut être utilisé en multipliant les valeurs par le facteur R_0/100 Ω.

Les valeurs de température données dans la norme NF EN 60751 sont exprimées en degré Celsius et par le symbole t en accord avec la l'Echelle Internationale de Température de 1990 (EIT-90). Le tableau 8.1 extrait de cette norme le rappelle par l'indication « t_{90}/°C ».

Tableau 8.1 – Relation température/résistance d'une résistance Pt100 (entre –200 °C et 329 °C) (doc. Afnor NF EN 60751)

t_{90}/°C	Résistance à la température t_{90}/°C Ω										t_{90}/°C
	0	–1	–2	–3	–4	–5	–6	–7	–8	–9	
– 200	18,52										– 200
– 190	22,83	22,40	21,97	21,54	21,11	20,68	20,25	19,82	19,38	18,95	– 190
– 180	27,10	26,67	26,24	25,82	25,39	24,97	24,54	24,11	23,68	23,25	– 180
– 170	31,34	30,91	30,49	30,07	29,64	29,22	28,80	28,37	27,95	27,52	– 170
– 160	35,54	36,12	34,70	34,28	33,86	33,44	33,02	32,60	32,18	31,76	– 160
– 150	39,72	39,31	38,89	38,47	38,05	37,64	37,22	36,80	36,38	35,96	– 150
– 140	43,88	43,46	43,05	42,63	42,22	41,80	41,39	40,97	40,56	40,14	– 140
– 130	48,00	47,59	47,18	46,77	46,36	45,94	45,53	45,12	44,70	44,29	– 130
– 120	52,11	51,70	51,29	50,88	50,47	50,06	49,65	49,24	48,83	48,42	– 120
– 110	56,19	55,79	55,38	54,97	54,56	54,15	53,75	53,34	52,93	52,52	– 110
– 100	60,26	59,85	59,44	59,04	58,63	58,23	57,82	57,41	57,01	56,60	– 100
–90	64,30	63,90	63,49	63,09	62,68	62,28	61,88	61,47	61,07	60,66	– 90
–80	68,33	67,92	67,52	67,12	66,72	66,31	65,91	65,51	65,11	64,70	– 80
–70	72,33	71,93	71,53	71,13	70,73	70,33	69,93	69,53	69,13	68,73	– 70
–60	76,33	75,93	75,53	75,13	74,73	74,33	73,93	73,53	73,13	72,73	– 60
–50	80,31	79,91	79,51	79,11	78,72	78,32	77,92	77,52	77,12	76,73	– 50
–40	84,27	83,87	83,48	83,08	82,69	82,29	81,89	81,50	81,10	80,70	– 40
–30	88,22	87,83	87,43	87,04	86,64	86,25	85,85	85,46	85,06	84,67	– 30
–20	92,16	91,77	91,37	90,98	90,59	90,19	89,80	89,40	89,01	88,62	– 20
–10	96,09	95,69	95,30	94,91	94,52	94,12	93,73	93,34	92,95	92,55	– 10
0	100,00	99,61	99,22	98,83	98,44	98,04	97,65	97,26	96,87	96,48	0
t_{90}/°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	t_{90}/°C
0	100,00	100,39	100,78	101,17	101,56	101,95	102,34	102,73	103,12	103,51	0
10	103,90	104,29	104,68	105,07	105,46	105,85	106,24	106,63	107,02	107,40	10
20	107,79	108,18	108,57	108,96	109,36	109,73	110,12	110,51	110,90	111,29	20
30	111,67	112,06	112,45	112,83	113,22	113,61	114,00	114,38	114,77	115,15	30
40	115,54	115,93	116,31	116,70	117,08	117,47	117,86	118,24	118,63	119,01	40
50	119,40	119,78	120,17	120,55	120,94	121,32	121,71	122,09	122,47	122,86	50
60	123,24	123,63	124,01	124,39	124,78	125,16	125,54	125,93	126,31	126,69	60
70	127,08	127,46	127,84	128,22	128,61	128,99	129,37	129,75	130,13	130,52	70
80	130,90	131,28	131,66	132,04	132,42	132,80	133,18	133,57	133,95	134,33	80
90	134,71	135,09	135,47	135,85	136,23	136,61	136,99	137,37	137,75	138,13	90
100	138,51	138,88	139,26	139,64	140,02	140,40	140,78	141,16	141,54	141,91	100
110	142,29	142,67	143,05	143,43	143,80	144,18	144,56	144,94	145,31	145,69	110
120	146,07	146,44	146,82	147,20	147,57	147,95	148,33	148,70	149,08	149,46	120
130	149,83	150,21	150,58	150,96	151,33	151,71	152,08	152,46	152,83	153,21	130
140	153,58	153,96	154,33	154,71	155,08	155,46	155,83	156,20	156,58	156,95	140
150	157,33	157,70	158,07	158,45	158,82	159,19	159,56	159,94	160,31	160,68	150
160	161,05	161,43	161,80	162,17	162,54	162,91	163,29	163,66	164,03	164,40	160
170	164,77	165,14	165,51	165,89	166,26	166,63	167,00	167,37	167,74	168,11	170
180	168,48	168,85	169,22	169,59	169,96	170,33	170,70	171,07	171,43	171,80	180
190	172,17	172,54	172,91	173,28	173,65	174,02	174,38	174,75	175,12	175,49	190
200	175,86	176,22	176,59	176,96	177,33	177,69	178,06	178,43	178,79	179,16	200
210	179,53	179,89	180,26	180,63	180,99	181,36	181,72	182,09	182,46	182,82	210
220	183,19	183,55	183,92	184,28	184,65	185,01	185,38	185,74	186,11	186,47	220
230	186,84	187,20	187,56	187,93	188,29	188,66	189,02	189,38	189,75	190,11	230
240	190,47	190,84	191,20	191,56	191,92	192,29	192,65	193,01	193,37	193,74	240
250	194,10	194,46	194,82	195,18	195,55	195,91	196,27	196,63	196,99	197,35	250
260	197,71	198,07	198,43	198,79	199,15	199,51	199,87	200,23	200,59	200,95	260
270	201,31	201,67	202,03	202,39	202,75	203,11	203,47	203,83	204,19	204,55	270
280	204,90	205,26	205,62	205,98	206,34	206,70	207,05	207,41	207,77	208,13	280
290	208,48	208,84	209,20	209,56	209,91	210,27	210,63	210,98	211,34	211,70	290
300	212,05	212,41	212, 76	213,12	213,48	213,83	214,19	214,54	214,90	215,25	300
310	215,61	215,96	216,32	216,67	217,03	217,38	217,74	218,09	218,44	218,80	310
320	219,15	219,51	219,86	220,21	220,57	220,92	221,27	221,63	221,98	222,33	320

Tableau 8.2 – Relation température/résistance d'une résistance Pt100 (entre 330 °C et 850 °C) (doc. Afnor NF EN 60751)

t_{90}/°C	Résistance à la température t_{90}/°C W										t_{90}/°C
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
330	222,68	223,04	223,39	223,74	224,09	224,45	224,80	225,15	225,50	225,85	330
340	226,21	226,56	226,91	227,26	227,61	227,96	228,31	228,66	229,02	229,37	340
350	229,72	230,07	230,42	230,77	231,12	231,47	231,82	232,17	232,52	232,87	350
360	233,21	233,56	233,91	234,26	234,61	234,96	235,31	235,66	236,00	236,35	360
370	236,70	237,05	237,40	237,74	238,09	238,44	238,79	239,13	239,48	239,83	370
380	240,18	240,52	240,87	241,22	241,56	241,91	242,26	242,60	242,95	243,29	380
390	243,64	243,99	244,33	244,68	245,02	245,37	245,71	246,06	246,40	246,75	390
400	247,09	247,44	247,78	248,13	248,47	248,81	249,16	249,50	249,85	250,19	400
410	250,53	250,88	251,22	251,56	251,91	252,25	252,59	252,93	253,28	253,62	410
420	253,96	254,30	254,65	254,99	255,33	255,67	256,01	256,35	256,70	257,04	420
430	257,38	257,72	258,06	258,40	258,74	259,08	259,42	259,76	260,10	260,44	430
440	260,78	261,12	261,46	261,80	262,14	262,48	262,82	263,16	263,50	263,84	440
450	264,18	264,52	264,86	265,20	265,53	265,87	266,21	266,55	266,89	267,22	450
460	267,56	267,90	268,24	268,57	268,91	269,25	269,59	269,92	270,26	270,60	460
470	270,93	271,27	271,61	271,94	272,28	272,61	272,95	273,29	273,62	273,96	470
480	274,29	274,63	274,96	275,30	275,63	275,97	276,30	276,64	276,97	277,31	480
490	277,64	277,98	278,31	278,64	278,98	279,31	279,64	279,98	280,31	280,64	490
500	280,98	281,31	281,64	281,98	282,31	282,64	282,97	283,31	283,64	283,97	500
510	284,30	284,63	284,97	285,30	285,63	285,96	286,29	286,62	286,95	287,29	510
520	287,62	287,95	288,28	288,61	288,94	289,27	289,60	289,93	290,26	290,59	520
530	290,92	291,25	291,58	291,91	292,24	292,56	292,89	293,22	293,55	293,88	530
540	294,21	294,54	294,86	295,19	295,52	295,85	296,18	296,50	296,83	297,16	540
550	297,49	297,81	298,14	298,47	298,80	299,12	299,45	299,78	300,10	300,43	550
560	300,75	301,08	301,41	301,73	302,06	302,38	302,71	303,03	303,36	303,69	560
570	304,01	304,34	304,66	304,98	305,31	305,63	305,96	306,28	306,61	306,93	570
580	307,25	307,58	307,90	308,23	308,55	308,87	309,20	309,52	309,84	310,16	580
590	310,49	310,81	311,13	311,45	311,78	312,10	312,42	312,74	313,06	313,39	590
600	313,71	314,03	314,35	314,67	314,99	315,31	315,64	315,96	316,28	316,60	600
610	316,92	317,24	317,56	317,88	318,20	318,52	318,84	319,16	319,48	319,80	610
620	320,12	320,43	320,75	321,07	321,39	321,71	322,03	322,35	322,67	322,98	620
630	323,30	323,62	323,94	324,26	324,57	324,89	325,21	325,53	325,84	326,16	630
640	326,48	326,79	327,11	327,43	327,74	328,06	328,38	328,69	329,01	329,32	640
650	329,64	329,96	330,27	330,59	330,90	331,22	331,53	331,85	332,16	332,48	650
660	332,79	333,11	333,42	333,74	334,05	334,36	334,68	334,99	335,31	335,62	660
670	335,93	336,25	336,56	336,87	337,18	337,50	337,81	338,12	338,44	338,75	670
680	339,06	339,37	339,69	340,00	340,31	340,62	340,93	341,24	341,56	341,87	680
690	342,18	342,49	342,80	343,11	343,42	343,73	344,04	344,35	344,66	344,97	690
700	345,28	345,59	345,90	346,21	346,52	346,83	347,14	347,45	347,76	348,07	700
710	348,38	348,69	348,99	349,30	349,61	349,92	350,23	350,54	350,84	351,15	710
720	351,46	351,77	352,08	352,38	352,69	353,00	353,30	353,61	353,92	354,22	720
730	354,53	354,84	355,14	355,45	355,76	356,06	356,37	356,67	356,98	357,28	730
740	357,59	357,90	358,20	358,51	358,81	359,12	359,42	359,72	360,03	360,33	740
750	360,64	360,94	361,25	361,55	361,85	362,16	362,46	362,76	363,07	363,37	750
760	363,67	363,98	364,28	364,58	364,89	365,19	365,49	365,79	366,10	366,40	760
770	366,70	367,00	367,30	367,60	367,91	368,21	368,51	368,81	369,11	369,41	770
780	369,71	370,01	370,31	370,61	370,91	371,21	371,51	371,81	372,11	372,41	780
790	372,71	373,01	373,31	373,61	373,91	374,21	374,51	374,81	375,11	375,41	790
800	375,70	376,00	376,30	376,60	376,90	377,19	377,49	377,79	378,09	378,39	800
810	378,68	378,98	379,28	379,57	379,87	380,17	380,46	380,76	381,06	381,35	810
820	381,65	381,95	382,24	382,54	382,83	383,13	383,42	383,72	384,01	384,31	820
830	384,60	384,90	385,19	385,49	385,78	386,08	386,37	386,67	386,96	387,25	830
840	387,55	387,84	388,14	388,43	388,72	389,02	389,31	389,60	389,90	390,19	840
850	390,48										850

8.2 Valeurs de l'émissivité ε de différents matériaux

Tableau 8.3 – Émissivité des métaux (source TESTO)

Métaux			
Matière	**Type/structure/Élément**	**Température (°C)**	**ε**
Aluminium	non oxydé	25	0,02
	non oxydé	100	0,03
	non oxydé	500	0,06
	oxydé	200	0,11
	oxydé	600	0,19
	très oxydé	93	0,20
	très oxydé	500	0,31
	polissage fin	100	0,09
	non poli	100	0,18
Plomb	poli	38-260	0,06-0,08
	rugueux	40	0,43
	oxydé	40	0,43
	oxydé gris	40	0,28
Chrome	chrome	40	0,08
	chrome	540	0,26
	chrome poli	150	0,06
Fer	oxydé	100	0,74
	oxydé	500	0,84
	non oxydé	100	0,05
	rouille couche mince	25	0,70
	rouille	25	0,65
Or	verni	100	0,37
	poli	38-260	0,02
Fonte de fusion	oxydé	200	0,64
	oxydé	600	0,78
	non oxydé	100	0,21
	très oxydé	40-250	0,95
Tableau d'inconel	tablette d'inconel	540	0,28
	tablette d'inconel	650	0,42
Cadmium	cadmium	25	0,02
Cobalt	non oxydé	500	0,31
Cuivre	oxyde de cuivre	100	0,87
	oxyde de cuivre	260	0,83
	oxyde de cuivre	540	0,77
	oxydé noir	40	0,78
	corrodé	40	0,09
	poli	40	0,03
	laminé	40	0,64
	brut	40	0,74
	fondu	540	0,15
Alliage	Ni 20, Cr 24, Fe 55 oxydée	200	0,90
	Ni 60, Cr 12, Fe 28 oxydée	270	0,89
	Ni 80, Cr 20, oxydée	100	0,87
Magnésium	magnésium	40 jusqu'à 260	0,07 jusqu'à 0,13

Tableau 8.3 – Émissivité des métaux (source TESTO) *(suite)*

Métaux			
Matière	**Type/structure/Elément**	**Température (°C)**	**ε**
Laiton	73 % Cu, 27 % Zn, poli	250	0,03
	62 % Cu, 37 % Zn, poli	260	0,03
	matté	20	0,07
	bruni	20	0,40
	oxydé	200	0,61
	non oxydé	25	0,04
Molybdène	molybdène	40	0,06
	molybdène	250	0,08
	molybdène	540	0,11
Monel	Ni Cu	200	0,41
	monel	400	0,44
	monel	600	0,46
	oxydé	20	0,43
Nickel	poli	40	0,05
	oxydé	40 jusqu'à 260	0,31 jusqu'à 0,46
	non oxydé	25	0,05
	non oxydé	100	0,06
	non oxydé	500	0,12
	galvanisé	40	0,04
Platine	platine	40 jusqu'à 260	0,05
	platine	540	0,10
	noire	40	0,93
	noire	260	0,96
	oxydé à 600 °C	260	0,07
	oxydé à 600 °C	540	0,11
Mercure	mercure	0	0,09
	mercure	25	0,10
	mercure	100	0,12
Argent	poli	40	0,01
	poli	260	0,02
	poli	540	0,03
Fer forgé	mat	25	0,94
	mat	350	0,94
	lisse	40	0,35
	poli	40	0,28
Acier	laminé à froid	93	0,75 jusqu'à 0,85
	table polie	40	0,07
	table polie	260	0,00
	table polie	540	0,14
	acier tendre sans alliage, poli	25	0,10
	acier tendre sans alliage, poli	25	0,12
	non oxydé	100	0,08
	oxydé	25	0,80
Alliage d'acier	type 301, poli	25	0,27
	type 316, poli	25	0,28
	type 321, poli	150 jusqu'à 815	0,18 jusqu'à 0,49

Tableau 8.3 – Émissivité des métaux (source TESTO) *(suite)*

Métaux			
Matière	**Type/structure/Elément**	**Température (°C)**	**ε**
Stellite	poli	20	0,18
Tantale	non oxydé	727	0,14
Bismuth	clair	80	0,34
	non oxydé	25	0,05
	non oxydé	100	0,06
Zinc	pureté commerciale habituelle (99,1 %)	260	0,05
	galvanisé	40	0,28
	poli	260 jusqu'à 540	0,11
	poli	38	0,02
	poli	260	0,03
	poli	540	0,04
Etain	non oxydé	25	0,04
	non oxydé	100	0,05

Tableau 8.4 – Émissivité des matériaux non métalliques (source TESTO)

Non métallique			
Matière	**Type/structure/Elément**	**Température (°C)**	**ε**
Peinture aluminium	peinture aluminium	40	0,27 jusqu'à 0,67
	10 % Al	40	0,52
	26 % Al	40	0,30
Amiante	asphalte, revêtement routier	20	0,93
	asphalte, papier goudronné	20	0,72
	toile	93	0,90
	papier	38 jusqu'à 370	0,93
	plaque	40	0,96
	ciment	0 jusqu'à 200	0,96
Basalte	basalte	20	0,72
Tissus en laine	tissus en laine	20	0,77
Minium de plomb	minium de plomb	100	0,93
Peinture bronze	peinture bronze	faible	0,34 jusqu'à 0,80
Glace	lisse	0	0,97
	rugueuse	0	0,98
Terre	en général	40	0,38
	terre argileuse sombre	20	0,66
	champ labouré	20	0,38
Peinture	bleu, Cu 203	25	0,94
	noir, Cu 0	25	0,96
	vert, Cu 203	25	0,92
	rouge, Fe 203	25	0,91
	blanc, Al 203	25	0,94
Plâtre	plâtre	20	0,80 jusqu'à 0,90
Verre	verre plat plan	0 jusqu'à 90	0,92 jusqu'à 0,94
	convex D	100	0,80
	convex D	500	0,76
	Nowex	100	0,82

Tableau 8.4 – Émissivité des matériaux non métalliques (source TESTO) *(suite)*

Non métallique			
Matière	**Type/structure/Elément**	**Température (°C)**	**ε**
Granite	granite	20	0,45
Caoutchouc	caoutchouc dur	25	0,94
	tendre gris	25	0,86
Bois	bois	faible	0,80 bis 0,90
	hêtre, raboté	70	0,94
	chêne, raboté	40	0,91
	pin raboté	40	0,89
Mortier chaux	mortier chaux	40 jusqu'à 260	0,90 jusqu'à 0,92
Grès argilo-calcaire	grès argilo-calcaire	40	0,95
Céramique	porcelaine	20	0,92
	grès cérame, vitrifié	20	0,90
	grès cérame, mat	20	0,93
Gravier	gravier	40	0,28
Carbone	cendre de flamme	25	0,95
	non oxydé	25	0,81
	non oxydé	100	0,81
	non oxydé	500	0,79
	suie de cendre	120	0,95
	fibre	260	0,95
	graphité	100	0,76
	graphité	300	0,75
	graphité	500	0,71
Vernis	bleu, sur film aluminium	40	0,78
	jaune, 2 couches sur film alu	40	0,79
	clair, 2 couches sur film alu	90	0,09
	clair, sur cuivre clair	90	0,65
	clair, sur cuivre ternis	90	0,64
	rouge, 2 couches sur film alu	40	0,74
	noir, Cu 0	90	0,96
	blanc	90	0,95
	blanc, 2 couches sur film alu	40	0,88
Argile	argile	20	0,39
	brûlé	70	0,91
	schisteux	20	0,69
Marbre	blanc	40	0,95
	lisse, blanc	40	0,56
	poli, gris	40	0,75
Maçonnerie	maçonnerie	40	0,93
Huile sur nickel	épaisseur de couche 0,02 mm	22	0,27
	épaisseur de couche 0,05 mm	22	0,46
	épaisseur de couche 0,10 mm	22	0,72
Peinture huile	toutes les couleurs	90	0,92 jusqu'à 0,96
	gris vert	20	0,95
	vert, Cu 203	90	0,95
	rouge	90	0,95
	noir CuO	90	0,92

Tableau 8.4 – Émissivité des matériaux non métalliques (source TESTO) *(suite)*

Non métallique			
Matière	**Type/structure/Elément**	**Température (°C)**	**ε**
Peinture huile *(suite)*	noir brillant	20	0,90
	camouflage	50	0,85
	blanc	90	0,94
Verre quartz	1,98 mm	280	0,90
	6,88 mm	280	0,93
	vert opaque	300	0,92
Suie	acétylène	25	0,97
	camphre	25	0,94
	suie de lampe	95	0,96
	suie de bougie	120	0,95
	charbon	20	0,95
Sable	sable	20	0,76
Grès	grès	40	0,67
Sciure	sciure	20	0,75
Ardoise	ardoise	20	0,69
Neige	fine	–7	0,82
	gros flocons	–8	0,89
Émeri	émeri	80	0,86
Soie	soie	20	0,78
Carbure de silice	carbure de silice	150 jusqu'à 650	0,83 jusqu'à 0,96
Eau	eau	40	0,67
Verre d'eau	verre d'eau	20	0,96
Colle cellulosique	2 couches	20	0,34
Tuile	séchée à l'air	20	0,90
	rouge, rugueuse	20	0,93

8.3 Descriptions de deux méthodes mathématiques de calcul des températures moyennes de rayonnement

Les deux méthodes mathématiques exposées à titre d'information ci-après sont volontairement décrites succinctement car elles ne sont pas directement liées à la métrologie dans le domaine du génie climatique mais peuvent intéresser le lecteur pour d'autres applications.

8.3.1 Méthode basée sur les températures et sur les facteurs de forme

La première méthode mathématique est basée sur les températures des surfaces environnantes et sur le facteur de forme de ces surfaces tenant compte de leur surface, de leurs dimensions et de leur position relative par rapport l'individu. Voir Figure 8.1. La température moyenne de rayonnement est obtenue par l'équation :

$$T_r^4 = (T_1{}^4.F_{p-1}) + (T_2{}^4.F_{p-2}) + \ldots T_N{}^4.F_{p-N}$$

avec :

T_r = température moyenne de rayonnement, en kelvins.

T_n = température de surface de la surface N, en kelvins.
$F_{p\text{-}N}$ = est le facteur de forme entre une personne et la surface N.

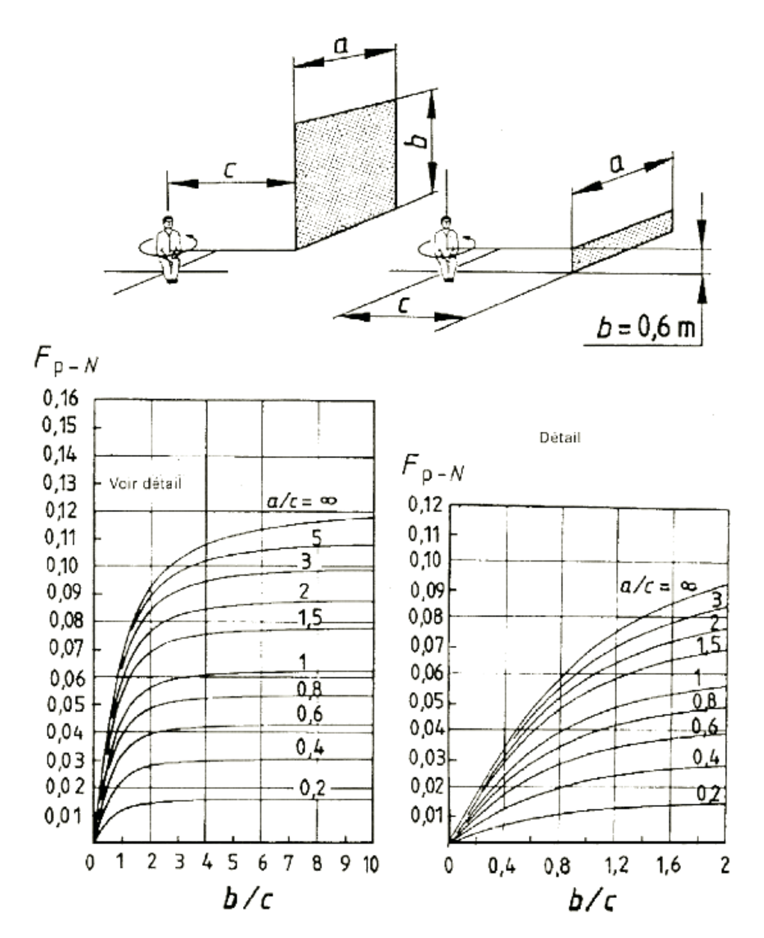


Figure 8.1 – Exemple de valeur moyenne de facteur de forme entre une personne assise et un rectangle vertical.

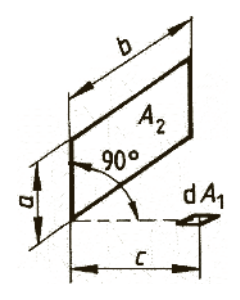
Cette méthode est décrite précisément dans la norme NF EN ISO 7726.

8.3.2 Méthode basée sur la température plane de rayonnement

La deuxième méthode mathématique est basée sur le calcul de la température plane de rayonnement t_{pr}, dans six directions en fonction de facteurs de forme, et sur le facteur d'aire projetée par une personne dans les six mêmes directions (haut, bas, gauche, droite, devant et derrière). Le corps humain est assimilé à six surfaces projetées en fonction de sa position.
La température de rayonnement moyenne est obtenue en multipliant les six valeurs mesurées par les facteurs d'aire projetée et en divisant le tout par la somme des facteurs d'aire.

Tableau 8.5 – Facteur d'aire projetée par le corps humain

		Haut/bas	Gauche/droite	Devant/derrière
Debout	Personne	0,08	0,23	0,35
	Ellipsoïde	0,08	0,28	0,28
	Sphère	0,25	0,25	0,25
Assis	Personne	0,18	0,22	0,30
	Ellipsoïde	0,18	0,22	0,28
	Sphère	0,25	0,25	0,25



Élément plan dA_1 et rectangle dans un plan à 90° du plan de l'élément.

$$X = \frac{a}{b} \quad Y = \frac{c}{b}$$

$$F_{d1-2} = \frac{1}{2\pi}\left(\tan^{-1}\frac{1}{Y} - \frac{Y}{\sqrt{X^2+Y^2}}\tan^{-1}\frac{1}{\sqrt{X^2+Y^2}}\right)$$

Figure 8.2 – Exemple de calcul de facteur de forme d'un petit élément plan perpendiculaire à une surface rectangulaire.

Par exemple, pour une personne assise :

$$\bar{t}_r = \frac{[0,18(t_{\text{pr haut}} + t_{\text{pr bas}})] + [0,22(t_{\text{pr droite}} + t_{\text{pr gauche}})] + [0,30(t_{\text{pr devant}} + t_{\text{pr derrière}})]}{2(0,08 + 0,22 + 0,30)}$$

Cette méthode est aussi décrite précisément dans la norme NF EN ISO 7726.

D

Les mesures d'hygrométrie

9 • LES MOYENS DE MESURAGE

En matière de confort, l'humidité de l'air ambiant est un facteur tout aussi important que la température ou que le renouvellement d'air. La mesure de l'humidité fait intervenir des paramètres physiques complexes et l'arrivée des capteurs électroniques a permis de faciliter les opérations de mesurage.

Les mesures d'hygrométrie de l'air ambiant peuvent être réalisées de différentes manières. Le présent chapitre concerne les mesurages réalisés avec des appareils de mesure portatifs de « terrain ».

Pour ce qui concerne les équipements de laboratoires, notamment ceux destinés à l'étalonnage, nous recommandons au lecteur de se rapprocher de littératures spécialisées et de fabricants développant ce type de produit.

L'attention du lecteur est apportée sur les contraintes de températures de fonctionnement de la plupart des hygromètres. La zone de 0 °C à 100 °C ne pose pas de problème particulier. Par contre, en deçà et au-delà, des précautions d'usage seront à observer.

On pourra trouver en annexe au présent chapitre la justification de certains principes retenus.

Ce chapitre abordera les définitions nécessaires à la compréhension du « jargon » du climaticien, ainsi que les différents moyens techniques dont il dispose pour procéder à ces mesurages.

Puis nous exposerons les principes de fonctionnement de ces équipements et les principes de mesurage.

■ Définitions (d'après la norme NF X 15-110)

□ Air sec

Mélange de gaz contenant principalement de l'azote, de l'oxygène, de l'argon, du gaz carbonique et, en faibles quantités, un certain nombre d'autres gaz (néon, hélium, krypton, etc.). Les proportions de ces différents gaz, tout en variant légèrement en fonction du temps et du lieu, peuvent être considérées en première approximation comme constantes (air de référence).

Pour mémoire, la fraction molaire x_i du composant i d'un mélange gazeux est définie par :

$$x_i = \frac{\frac{m_i}{M_i}}{\sum\left(\frac{m_i}{M_i}\right)}$$

Tableau 9.1 – Composition de l'air (source AFNOR)

Gaz constituants	Fraction molaire (exprimée en pourcentage)
Azote	78,09
Oxygène	20,95
Argon	0,93
Anhydride carbonique	0,03
Néon	$1{,}8 \times 10^{-3}$
Hélium	$5{,}24 \times 10^{-4}$
Krypton	$1{,}0 \times 10^{-4}$
Hydrogène	$5{,}0 \times 10^{-5}$
Xénon	$8{,}0 \times 10^{-6}$
Ozone	$1{,}0 \times 10^{-6}$
Radon	$6{,}0 \times 10^{-18}$

avec :
m_i = masse du composant i dans un volume ou une masse donnée du mélange.
M_i = masse molaire.

D'autre part :

– masse molaire de la vapeur d'eau : 18,015 28.10^{-3} kg/mol.
– masse molaire de l'air sec : 28,964 55.10^{-3} kg/mol.

☐ **Air humide**

Mélange en proportion variable d'air sec et de vapeur d'eau.

Note
La vapeur d'eau étant de l'eau à l'état gazeux, la présence d'eau sous forme liquide en suspension (brouillard), n'intervient pas dans la notion d'air humide et n'entre pas dans le cadre de la norme NF X 15-110.

☐ **Air saturé**

Air humide à une température et à une pression données dont la quantité de vapeur est à une valeur telle que toute la quantité d'eau supplémentaire ne peut apparaître que sous forme liquide ou solide.

9.1 Le psychromètre

Le psychromètre est le moyen de détermination de l'hygrométrie ambiante le plus ancien. Il a été conçu par l'ingénieur météorologiste Richard ASSMANN en 1887.
Il permet de mesurer la température sèche (voir *supra*) et la température humide (voir *supra*). Par contre, les autres paramètres physiques de l'air ambiant, tels que l'humidité relative, l'enthalpie, le point de rosée,…, ne pourront qu'être calculés ou déterminés sur un abaque psychrographique à partir de ces deux valeurs de température.

Le psychromètre est constitué de deux thermomètres identiques appairés, c'est-à-dire de même type, de même provenance et étalonné en même temps. Un pour mesurer la température sèche, et un second avec l'élément sensible équipé d'une « chaussette » mouillée pour mesurer la température humide.

Un tube d'eau rempli d'eau pure (distillée ou déminéralisé) permet de maintenir le manchon en tissu situé à la base le bulbe du thermomètre humide en permanence malgré le ventilateur (non représenté) qui accélère la circulation d'air favorisant l'évaporation.

Le type de modèle relativement ancien se présente sous cette forme :

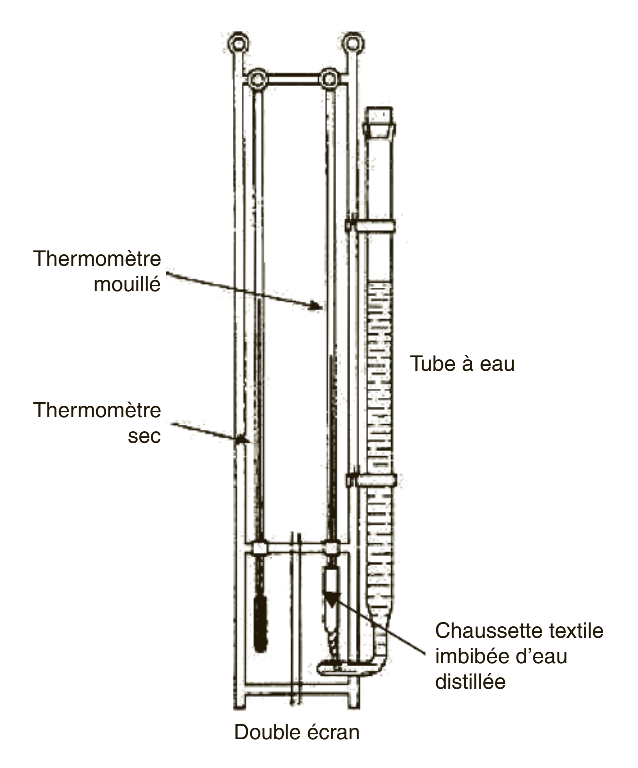


Figure 9.1 – Principe de l'hygromètre

Il présente l'avantage d'être facilement réalisable.

D'une conception plus récente, mais basée sur le même principe de ventilation forcée sur une sonde mouillée, un modèle type Ultrakust permet une préhension plus facile pour des mesures sur site :

La précision de ce type de psychromètre se situe entre ± 0,5 °C et ± 1 °C.

Le domaine d'utilisation de ces types de psychromètre est limité à des températures sèches supérieures à 0 °C et inférieures à 100 °C, sauf modèle très particulier qui peuvent fonctionner au-delà de ces limites.

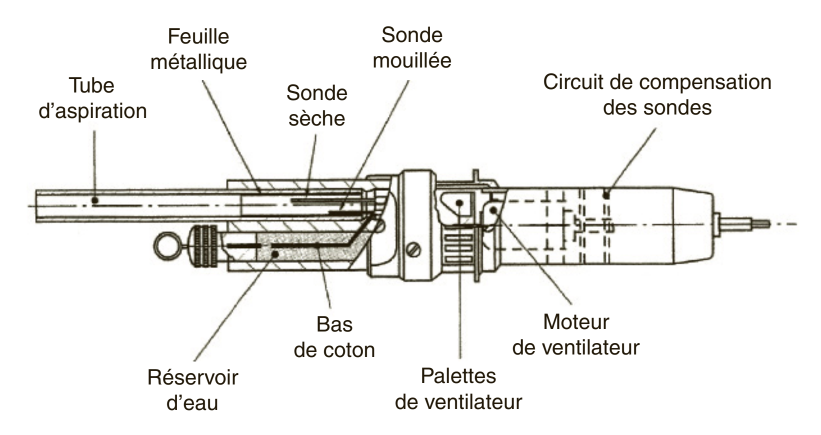


Figure 9.2 – Psychromètre ventilé (doc. Ultrakust)

9.1.1 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement du psychromètre repose sur la lecture simultanée de la température sèche et de la température humide.

La température sèche est lue sur un thermomètre à bulbe tout à fait classique.

La température humide est lue sur le thermomètre (à droite sur le dessin) dont le bulbe est maintenu humide grâce à une chaussette imbibée d'eau distillée, et dont le refroidissement est obtenu par évaporation.

Pour accélérer la convection de l'air et le refroidissement du manchon, les premiers modèles d'hygromètres étaient manipulés comme une fronde que l'on faisait tourner quelques minutes à bout de bras.

Depuis environ 40 ans, un petit ventilateur installé à la base du thermomètre humide permet d'obtenir le même résultat sans effort. Un mécanisme à clé, identique à celui d'un réveil, permet de remonter un ressort qui fournit l'énergie nécessaire à la rotation du ventilateur (modèle Jules Richard et Pécly). Une vitesse de circulation d'air entre 2 et 6 m/s est nécessaire.

L'eau pure utilisée étant généralement à la température ambiante, il est nécessaire d'attendre quelques minutes pour atteindre la température humide de l'air.

Le manchon doit être réalisé dans un matériau ayant une grande capillarité (tissu, toile de gaz,…) et suffisamment long pour bien recouvrir le bulbe et éviter le rayonnement extérieur.

Le thermomètre mouillé placé dans le flux d'air à la température T, indique une température humide T_w.

En considérant l'air et la vapeur d'eau comme des gaz parfaits (pour mémoire, à C_p constant) et l'enthalpie de l'air humide égale à la somme des enthalpies des gaz le constituant (air sec et vapeur), on peut écrire pour un système adiabatique (pour mémoire, sans échange de chaleur avec l'extérieur) que l'écart entre la température sèche T et la température humide T_w peut s'écrire :

$$T - T_w = \frac{(r_w . T_{w,p} - r) . Q(T_w)}{C_p + r . C_{pw}}$$

avec :
T = température thermodynamique de l'air humide, en K.
T_w = température thermodynamique du thermomètre mouillé (égale à la température de l'air humide), en K.
r_w = rapport de mélange à saturation à la température T_w et à la pression p.
$T_{w,p}$ = température thermodynamique du thermomètre mouillé (égale à la température de l'air humide) à la pression p, en K.
r = rapport de mélange de l'air humide considéré.
$Q(T_w)$ = quantité de chaleur de vaporisation de l'eau à la température T_w, en J.
C_p = capacité thermique à pression constante de l'air sec égale à 1,006 J/(kg.K).
C_{pw} = capacité thermique à pression constante de la vapeur d'eau, en J/(kg.K).
En posant A_w, appelé coefficient psychrométrique, de valeur constante propre à l'hygromètre utilisé :

$$A_w = \frac{C_p}{\frac{M_v}{M_a}Q(T_w)} \frac{p - e'_w(T_{w,p})}{p}$$

avec :
A_w = coefficient psychrométrique de l'hygromètre utilisé.
M_v = masse molaire de la vapeur d'eau, égale à 28,96455.10^{-3} *kg/mol.*
M_a = masse molaire de l'air sec, égale à 18,01528.10^{-3} *kg/mol.*
Q = quantité de chaleur de vaporisation de l'eau à la température humide, en *J*.
$e'_w(T_{w,p})$ = pression de vapeur saturante de l'air humide par rapport à l'eau, en *Pa*.

Nota
Le rapport M_v/M_a est égal à 0,621 98.

En pratique, le coefficient psychrométrique A_w dépend de la conception et de la réalisation de l'hygromètre. Cette valeur est fournie par le fabricant après son étalonnage.
On peut simplifier l'équation pour obtenir e', la pression partielle de vapeur d'eau de l'air humide (équivalente à la pression de vapeur saturante de l'air humide à la température de rosée $e'_w(T_{d,p})$) :

$$e' = e'_w(T_{d,p}) = e'_w(T_{w,p}) - \mathrm{A}_w \cdot p \cdot (T - T_w)$$

avec :
e' = pression de vapeur de l'air humide, en Pa.
$e'_w(T_{d,p})$ = pression de vapeur saturante de l'air humide à la température de rosée à la pression p, en Pa.
$e'_w(T_{w,p})$ = pression de vapeur saturante de l'air humide par rapport à l'eau à la température humide T_w et à la pression p, en Pa.
A_w = coefficient psychrométrique de l'hygromètre utilisé.
p = pression totale de l'air humide, en Pa.
T = température de l'air humide, en K.
T_w = température humide, en K.

Mais il existe une méthode de détermination de tous les paramètres physiques de l'air humide à l'aide du diagramme psychrographique en connaissant la température sèche et la température humide. Cette méthode est détaillée au chapitre ci-après.

9.1.2 Principe de mesurage

La mesure à réaliser s'effectue dans le local concerné ou à l'extérieur pour connaître les données physiques de l'air neuf.
Il faut quelques minutes pour que la chaussette humide atteigne la température d'équilibre avec l'air ambiant.
Après plusieurs utilisations, il y a lieu de remplacer la chaussette qui risque d'avoir été polluée par l'air de ventilation (poussière, solvants, sels,…) qui, rappelons-le, doit circuler entre 2 et 6 m/s.
Il faut veiller à placer la sonde de température sèche en amont de la sonde humide si la mesure a lieu dans la veine d'air.
De même, il faut connaître la pression barométrique d'étalonnage de l'appareil afin d'apporter les corrections éventuelles. Les tableaux correctifs sont généralement fournis par le fabricant.
L'utilisation du diagramme psychrographique reste la solution la plus simple pour exploiter les mesurages de températures sèches et de températures humides réalisés avec un psychromètre.

Exemple

Après un mesurage de la température sèche T de 25 °C et de la température humide T_w de 17,8 °C, on peut placer le point M sur le diagramme ci-dessous et lire directement :

– la valeur de l'humidité relative $U = 50$ % (en prolongeant l'isotherme T_w jusqu'à la courbe de saturation, et en suivant l'oblique des températures humides jusqu'à l'isotherme T_{25}) ;

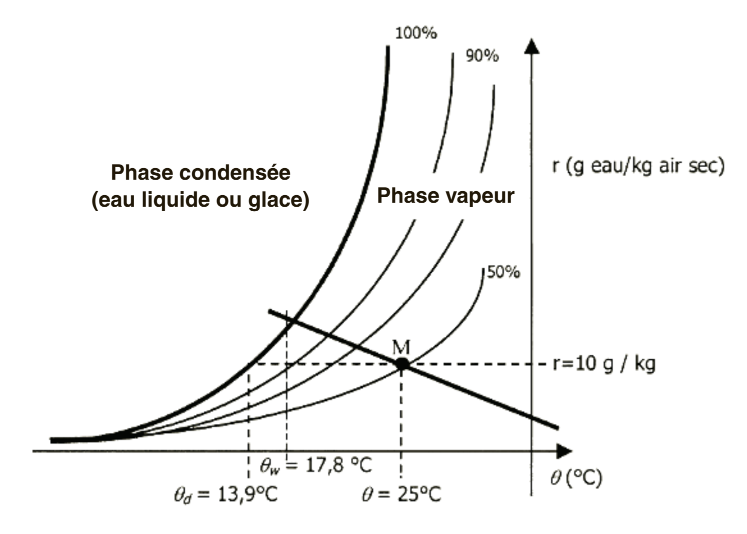


Figure 9.3 – Exemple d'utilisation du diagramme de l'air humide (source AFNOR)

– la température de rosée $\theta_d = 13{,}9$ °C (en prolongeant une horizontale depuis le point *M* jusqu'à la courbe de saturation et en lisant la température correspondante en abcisse) ;
– l'humidité absolue $r = 10$ g/kg air sec (en prolongeant une horizontale depuis le point *M* jusqu'à l'axe des ordonnées représentant l'humidité absolue).

Sur un diagramme de l'air humide plus complet, nous pourrions aussi lire :

– l'enthalpie $h = 50{,}38$ kJ/kg air sec (en suivant l'oblique de l'isenthalpe jusqu'à la graduation) ;
– le volume spécifique $v = 0{,}858$ m^3/kg air sec (sur la droite d'isochore), et calculer la masse volumique $\rho = 1/v = 1{,}165$ kg/m^3 ;
– la pression partielle de la vapeur d'eau, en Pa.

La lecture sur diagramme peut être confirmée par des logiciels de calculs tels que ceux développés par M. Casari, par M. Van Eeckhout, par Gaz de France, par Steam Calc…
Que ce soit avec la méthode graphique ou avec la méthode informatisée, il convient de vérifier que la pression de l'air humide correspond bien avec la réalité.
Comme on a pu le voir, la pression est un paramètre variable qui intervient dans les équations mathématiques alors que les graphes (AICVF, CARRIER, TRANE,…) sont tracés pour une pression atmosphérique standard de 101 325 Pa. Les logiciels sont souvent établis avec cette valeur, voire plus simplement avec 1.10^5 Pa.
S'il en est autrement, notamment en raison d'une installation située en altitude, il faudra en tenir compte dans les résultats.
A titre d'exemple, ci-dessous un tableau des différents résultats obtenus pour les psychromètres Assmann pour une pression atmosphérique variant entre 900 et 1 100 hPa. On peut noter les écarts importants, notamment pour le rapport de mélange *r*.

Tableau 9.2 – Influence de la pression atmosphérique

θ (°C)	θ_w (°C)	*p* (hPa)	$e'_w(\theta_w, p)$ (hPa)	*e'* (hPa)	θ_d (°C)	*U* (%)	*r*
20	19	1 100	22,087	21,364	18,5	90,9	0,012 3
20	19	1 013,25	22,081	21,414	18,5	91,1	0,013 4
20	19	900	22,072	21,480	18,6	91,5	0,015 2
20	16	1 100	18,274	15,388	13,3	65,5	0,008 8
20	16	1 013,25	18,268	15,610	13,6	66,4	0,009 7
20	16	900	18,261	15,900	13,9	67,7	0,011 2
20	13	1 100	15,051	10,016	6,9	42,6	0,005 7
20	13	1 013,25	15,046	10,408	7,5	44,3	0,006 5
20	13	900	15,040	10,920	8,2	46,5	0,007 6
20	10	1 100	12,339	5,166	– 2,4	22,0	0,002 9
20	10	1 013,25	12,335	5,728	– 1,0	24,4	0,003 5
20	10	900	12,330	6,461	0,7	27,5	0,004 5

9.2 L'hygromètre à capteur capacitif

L'hygromètre à capteur capacitif permet de mesurer l'hygrométrie relative U_w de l'air ambiant entre les valeurs normalisées de 2 % et 98 %, avec une précision entre ± 2 % et ± 5 %.

Le fonctionnement de ce type d'hygromètre est basé sur la variation d'impédance de son élément sensible. Certaines substances hygroscopiques de quelques micromètres d'épaisseur ont la propriété de se mettre en équilibre hygrométrique avec le milieu ambiant. Leur teneur en eau est fonction de l'humidité absolue et de la température de l'air, et a une influence sur la capacitance de l'élément sensible.

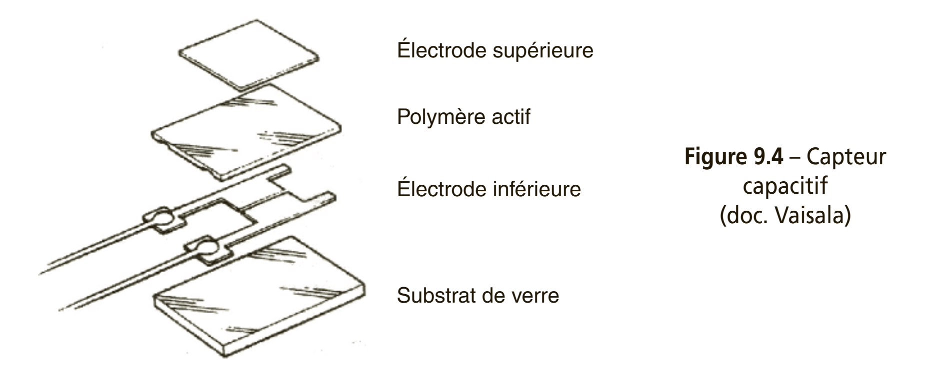


Figure 9.4 – Capteur capacitif (doc. Vaisala)

Les polymères présentent des courbes de variation de leurs propriétés électriques en fonction de la teneur en eau stable dans le temps (si exempte de pollution), réversible, linéaire et à hystérésis connue en fonction de la durée et des contraintes d'exposition.

Par contre, les polymères sont peu sensibles à la température, mais un temps d'équilibre thermique doit toutefois être observé au risque de fausser le résultat.

L'utilisation d'un filtre additif pour protéger l'élément sensible de la pollution augmente la durée d'équilibre thermique, ce qui risque aussi de fausser la mesure car l'hygromètre risque d'indiquer une humidité relative associée à sa propre température et donc différente de l'humidité relative ambiante.

Par contre, les hygromètres capacitifs sont peu sensibles à la température ambiante.

La dérive des résultats peut être importante en fonction de la fréquence d'utilisation et du milieu dans lequel ont lieu les mesurages. Si le capteur peut supporter d'être ponctuellement « mouillé », il peuvent subir une dérive lors de mesurages au-delà de 90 % d'humidité relative en raison de la modification de la courbe de sorption du polymère. D'autre part, si le temps de réponse de passage d'un taux d'humidité faible à un taux élevé est relativement court (quelques dizaines de secondes), l'inverse nécessite un temps de réponse beaucoup plus long (quelques dizaines de minutes) pour évacuer l'excédent d'humidité emmagasiné.

Une utilisation en milieu ambiant salin ou en milieu pollué devra être suivi d'un nettoyage l'élément sensible par le constructeur pour éliminer l'encrassement, voire un changement et un ré-étalonnage.

De même, l'utilisation, même fortuite, sur des gaz de combustion est à éviter en raison de l'agressivité potentielle de certains composés chimiques tels que le SO_2. Un ré-étalonnage annuel est recommandé par les fabricants.

9.2.1 Principe de fonctionnement

L'élément hygroscopique est généralement un polymère de quelques mm^2 à 2 cm^2 environ, et constitue le diélectrique du condensateur dont une électrode au moins est perméable à la vapeur d'eau. La mise en équilibre hygrométrique de l'isolant avec le milieu ambiant modifie la permittivité relative du diélectrique, ce qui a pour effet de faire varier la capacitance de l'élément sensible. Cette variation de capacité du condensateur est représentative de l'humidité relative de l'air.
La capacité est donnée par la formule :

$$C = 0{,}089\frac{S}{4.d.P}E_0\left(1 + P\frac{E_a - E_0}{E_a + 2E_0}\right)$$

avec :
C = capacitance de l'élément sensible.
S = surface en regard des plaques du capteur.
d = distance entre les plaques.
E_a = constante diélectrique de l'eau.
E_0 = constante diélectrique du matériau sec.
P = pourcentage d'humidité du matériau.

Utilisation en température négative

En raison des phénomènes de condensation, les hygromètres capacitifs indiquent généralement l'humidité relative par rapport à l'eau U_w. Il en existe d'autre qui l'indique par rapport à la glace U_i mais qui sont moins utilisés dans le domaine du génie climatique.
En raison de la prise en glace des condensats, la valeur de l'humidité relative est réduite. La plage de fonctionnement située entre – 50 °C/60 % et 0 °C/100 % est à proscrire (voir diagramme ci-dessous).

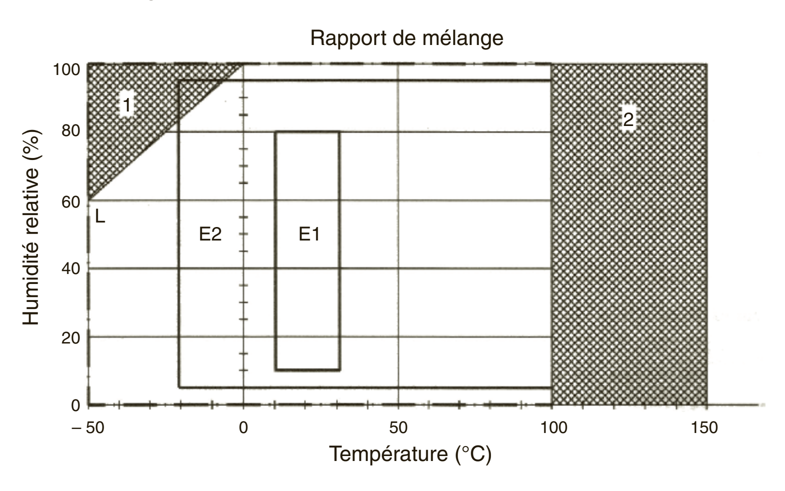


Figure 9.5 – Diagramme de fonctionnement de l'élément capacitif (doc. AFNOR)

D

LES MESURES D'HYGROMÉTRIE

La surface grisée 1 représente la zone dans laquelle la condensation entraîne la formation de glace.
La surface grisée 2 concerne les températures supérieures à 100 °C pour lesquelles les hygromètres capacitifs décrits dans cet ouvrage ne sont pas compatibles.
Les surfaces E1 et E2 correspondent aux deux zones où l'exactitude est normalisée et à respecter par les fabricants.
La surface L définit une partie des conditions limites.

■ **Utilisation en température supérieure à 100 °C**

Comme nous l'avons vu précédemment, l'hygrométrie relative U_w est fonction de la pression de vapeur saturante e_w de l'air humide par rapport à l'eau à la température θ.
Cette température θ est limitée, d'une part, par les tables de pression de vapeur saturante établies en phase pure jusqu'à 100 °C et, d'autre part, par la pression de vapeur saturante $\theta(e_w)$ qui ne peut être supérieure à pression totale de l'air dans le cas de l'application de la norme en vigueur.
Cette zone à proscrire est représentée par la surface L2 représentée dans le diagramme ci-dessus.

9.2.2 Principe de mesurage

Une attention particulière doit être apportée à l'exposition de l'élément sensible à des vitesses d'air trop importantes qui risqueraient de fausser le mesurage. Un maximum de 2 m/s est à observer, ce qui nécessite quelques précautions si l'on veut mesurer l'hygrométrie relative dans une gaine aéraulique. Il conviendra de se rapprocher du constructeur de l'hygromètre pour connaître les limites d'utilisation et les éventuelles corrections à apporter.
Les mesures en ambiance ne posent pas de problème particulier.

9.3 L'hygromètre à capteur résistif

L'hygromètre à capteur résistif permet de mesurer l'hygrométrie relative de l'air ambiant.
Comme l'hygromètre à capteur capacitif, il permet de mesurer l'hygrométrie relative U_w de l'air ambiant entre les valeurs normalisées de 2 % et 98 %, avec une précision entre ± 2 % et ± 5 %.
La plupart des fonctionnalités décrites dans le chapitre précédent relatif au capteur capacitif s'appliquent au capteur résistif.
La particularité de fonctionnement de ce type d'hygromètre est basée sur la variation de résistance de l'élément sensible constitué d'un matériau hygroscopique. Lorsque le polymère est en équilibre avec la teneur en eau de l'air ambiant, son impédance prend une valeur fonction de l'humidité de l'air, de l'ordre de 300 kΩ à 30 % d'hygrométrie relative U_w à 4 kΩ à 90 % d'U_w.
Comme pour le capteur capacitif, la température influe sur les réponses du corps hygroscopique et une compensation est nécessaire.
L'utilisation de filtre présente les avantages et les mêmes inconvénients que pour un capteur capacitif décrit ci-avant.

9.3.1 Principe de fonctionnement

On distingue deux modes de conduction de conduction électrique pour les capteurs résistifs : la conduction de surface et la conduction de masse.

Dans le cas de la conduction de surface, la variation de résistance est mesurée entre les deux électrodes en platine disposées sur une même face du conducteur hygroscopique.

Le principe est le même pour le conducteur de masse sauf que les deux électrodes sont situées chacune sur une face.

9.3.2 Principe de mesurage

Le principe de mesure est le même que pour les hygromètres à capteurs capacitifs.

9.4 Autres types d'hygromètres à variation d'impédance

Il existe deux autres hygromètres capacitifs : l'hygromètre à oxyde d'aluminium et l'hygromètre à oxyde de silicium.

Leur utilisation est moins fréquente dans le domaine du génie climatique mais leur intérêt respectif est à souligner.

9.4.1 L'hygromètre à oxyde d'aluminium

Dans ce type, le capteur est constitué d'une plaque d'aluminium anodisé présentant une oxydation surfacique poreuse. Une fine couche d'or poreuse aussi est déposée dessus. La plaque d'aluminium et la couche d'or composent des électrodes du condensateur, et la couche poreuse d'oxyde d'aluminium constitue le diélectrique.

L'hygromètre à oxyde d'aluminium permet d'atteindre des températures de rosée négatives jusqu'à – 50 °C.

9.4.2 L'hygromètre à oxyde de silicium

L'hygromètre à oxyde de silicium fonctionne sur le même principe que celui à oxyde d'aluminium. Son avantage est de mieux supporter la température ce qui permet d'associer une résistance électrique chauffante pour « assécher » le capteur après une utilisation en conditions saturantes (opération de désorption souvent longue), et de compenser la dérive du zéro de l'hygromètre.

Comme tout capteur capacitif, des étalonnages et des vérifications périodiques sont à prévoir.

9.5 Autres types d'hygromètres

Il existe d'autres types de psychromètre mais qui ne sont pas d'utilisation courante dans le domaine du génie climatique. Nous les citons pour mémoire afin que le lecteur puisse éventuellement compléter ses connaissances si nécessaire auprès de constructeurs spécialisés :

9.5.1 L'hygromètre à condensation

Son fonctionnement est basé sur la détection optoélectronique d'un faisceau lumineux réfléchit par un miroir refroidit soit par un réfrigérant (eau ou azote liquide), soit par effet Peltier.

9.5.2 L'hygromètre mécanique

Son fonctionnement est basé sur la propriété de certaines matières organiques (tels que le cheveu ou le crin par exemple, de se contracter ou de s'allonger en fonction de l'humidité de l'air.

9.5.3 L'hygromètre électrolytique

L'hygromètre électrolytique a deux électrodes en platine, ou en rhodium, entre lesquelles se trouve une couche d'anhydride phosphorique qui se transforme en acide phosphorique au contact de l'eau contenu dans l'air.
La tension continue entre les électrodes provoque l'électrolyse de l'eau avec dégagement d'oxygène, d'hydrogène et régénération de l'anhydride phosphorique. Le courant qui circule est proportionnel à la quantité d'eau électrolysée qui détermine en fonction du débit l'humidité absolue (en kg/m^3).

9.5.4 L'hygromètre à sorption

Il mesure la température d'équilibre d'une solution saline (chlorure de lithium) en fonction de laquelle on détermine la pression partielle de vapeur d'eau de l'air humide. On peut ensuite en déduire la température de rosée par étalonnage.

9.5.5 L'hygromètre piézo-électrique

Son fonctionnement est basé sur la fréquence de raisonnance d'un cristal de quartz relié mécaniquement à une substance hygroscopique dont la masse varie en fonction de l'eau absorbée. Il indique la fraction volumique de vapeur d'eau.

9.5.6 L'hygromètre à absorption infrarouge

Son fonctionnement est basé sur la propriété de l'eau pure d'absorber le rayonnement infrarouge dans la longueur d'onde comprise entre 1,4 et 1,9 µm. Il indique la fraction volumique de vapeur d'eau.
Comme pour les hygromètres à variation d'impédance, le principe de mesurage fondamental de tous ces hygromètres est de faire circuler l'air ambiant sur l'élément sensible.
On peut déterminer différents paramètres physiques en fonction du type d'hygromètre, notamment la température humide et la température sèche, et se reporter aux équations caractéristiques, aux tables de valeurs normalisées et aux abaques psychrométriques pour connaître les autres valeurs recherchées.

10 • LES MÉTHODES DE MESURAGE

10.1 Hygrométrie de l'air ambiant

Les hygromètres à variation d'impédance permettent de mesurer directement l'hygrométrie relative dans un local sans en modifier les conditions intérieures, sans échauffement ni refroidissement, ni prélèvement.
Après quelques dizaines de secondes pour atteindre l'équilibre thermique de l'hygromètre, la réponse se fait quasi instantanément.
Comme pour toute exploration dans un local, un simple mesurage fournit une valeur d'hygrométrie ponctuelle et non une donnée représentative de l'ensemble du volume. Si l'enceinte présente une hétérogénéité, notamment si le brassage d'air est faible, il y aura lieu de faire plusieurs mesurages à des endroits différents, notamment dans les angles murs extérieurs/plafond pour apprécier l'hygrométrie moyenne représentative.

10.2 Hygrométrie dans une gaine rectangulaire ou circulaire

Hormis la vitesse de circulation d'air dans le capteur, les mesurages en gaines ne posent pas de problème particulier. On tâchera de choisir des champs de mesure situés après un obstacle (coude, dérivation, rétrécissement…) afin que les turbulences engendrées créent un mélange de l'air véhiculés.
Les hygromètres étant sensibles à la température, il faudra éviter de les placer trop près d'une source chaude ou aditherme (batterie électrique, batterie chaude, paroi intérieure de gaine non calorifugée, batterie froide…).
De même, un mesurage trop près d'une batterie froide dépourvue de séparateur de gouttelettes, ou d'un humidificateur à vapeur risque de saturer le capteur en eau.

11 • ANNEXES

11.1 Les autres paramètres hygrométriques

Définitions d'après les normes NF X 15-110 et FD X 15-111.

11.1.1 Rapport de mélange (*r*)

Rapport de la masse de vapeur d'eau à la masse de l'air sec avec laquelle la vapeur d'eau est associée :

$$r = \frac{m_v}{m_a}$$

avec :
r = rapport de mélange.
m_v = masse de vapeur d'eau, en kg.
m_a = masse de l'air sec, en kg.

11.1.2 Humidité spécifique (*q*)

Rapport de la masse de vapeur d'eau à la masse de l'air humide dans laquelle la masse de vapeur d'eau est contenue, aussi appelé titre massique :

$$q = \frac{m_v}{m_v + m_a} = \frac{r}{1 + r}$$

avec :
q = humidité spécifique.
m_v = masse de vapeur d'eau, en kg.
m_a = masse de l'air sec, en kg.
$m_v + m_a$ = masse d'air humide, en kg.

11.1.3 Humidité absolue (ρ_v)

Rapport de la masse de vapeur d'eau au volume total d'air humide :

$$\rho_v = \frac{m_v}{V}$$

avec :
ρ_v = humidité absolue, en kg/m^3.
m_v = masse de vapeur d'eau, en kg.
V = volume total de l'air humide, en m^3.

11.1.4 Fraction volumique ou titre volumique (x)

C'est le rapport du volume de vapeur d'eau au volume total d'air humide :

$$x = \frac{v}{V}$$

avec :
x = fraction volumique.
v = volume de vapeur d'eau, en m^3.
V = volume total de l'air humide, en m^3.
Le résultat est exprimé en ppm (partie par million).
Les volumes de chaque constituant sont mesurés dans les mêmes conditions de température et de pression.
La fraction (ou concentration) volumique est mesurée par les hygromètres électrolytiques.

11.1.5 Fraction molaire de la vapeur d'eau d'un échantillon d'air humide (x_v)

Rapport du nombre de moles de vapeur d'eau au nombre total de moles de l'échantillon :

$$x_v = \frac{n_v}{n_v + n_a} = \frac{\frac{m_v}{M_v}}{\frac{m_v}{M_v} + \frac{m_a}{M_a}} = \frac{r}{r + \frac{M_v}{M_a}}$$

avec :
x_v = fraction molaire de la vapeur d'eau.
n_v = nombre de moles de vapeur d'eau.
n_a = nombre de moles d'air sec.
m_v = masse de vapeur d'eau, en kg.
M_v = masse molaire de la vapeur d'eau ($18{,}015\,28.10^{-3}$ kg/mol).
m_a = masse de l'air sec, en kg.
M_a = masse molaire de l'air sec ($28{,}964\,55.10^{-3}$ kg/mol).
r = rapport de mélange.

11.1.6 Pression de vapeur saturante en phase pure par rapport à l'eau (e_w)

La pression de vapeur saturante en phase pure par rapport à l'eau liquide est la pression de la vapeur dans un état d'équilibre indifférent avec une surface plane d'eau pure à la même température et à la même pression :

$$\ln(e_w) = -\,6\,096{,}938\,T^{-1} + 21{,}240\,964\,2 - 2{,}711\,193.10^{-2}\,T + 1{,}673\,952.10^{-5}\,T^2 + 2{,}433\,502\,\ln(T)$$

(équation applicable entre –173,15 K et +173,15 K)
avec :
e_w = pression de vapeur saturante par rapport à l'eau, en Pa.
T = température de l'air, en K.

D

LES MESURES D'HYGROMÉTRIE

Des tables établies ont été calculées par D. Sonntag à partir de l'échelle EIT(90) et figurent dans la norme AFNOR NF X 15-110 pour des valeurs –70 °C à + 100 °C, et de – 0,9 Pa à + 0,9 Pa.

11.1.7 Pression de vapeur de l'air humide (e')

Pression qu'exerce la vapeur d'eau, à la même température que celle de l'air humide, lorsqu'elle occupe seule la totalité du volume considéré :

$$e' = x_v p = \frac{r}{r + \frac{M_v}{M_a}} p$$

avec :

e' = pression de vapeur de l'air humide, en Pa.
p = pression totale de l'air humide, en Pa.
r = rapport de mélange.
x_v = fraction molaire de la vapeur d'eau de l'échantillon d'air humide.
M_v = masse molaire de la vapeur d'eau (18,015 28.10^{-3} kg/mol).
M_a = masse molaire de l'air sec (28,964 55.10^{-3} kg/mol).

11.1.8 Pression de vapeur de l'air humide par rapport à l'eau (e'_w)

$$e'_w = x_{vw} \cdot p$$

avec :

e'_w = pression de vapeur de l'air humide par rapport à l'eau, en Pa.
x_{vw} = fraction molaire de l'échantillon d'air humide saturé en présence d'eau.
p = pression totale de l'air humide, en Pa.

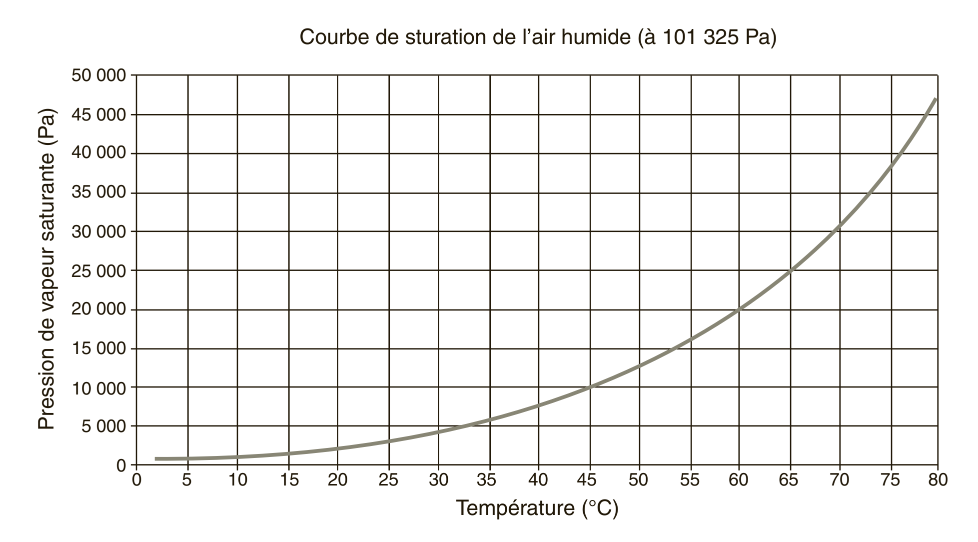


Figure 11.1 – Courbe de pression de vapeur saturante de l'air humide

11.1.9 Facteur d'augmentation de la pression de la vapeur saturante par rapport à l'eau (f_w)

Relation entre la pression de vapeur saturante de la phase pure et celle de l'air humide :

$$f_w(p,T) = \frac{e'_w}{e_w}$$

avec :
$f_w(p,T)$ = facteur d'augmentation en fonction de la pression p et de la température T.
e'_w = pression de vapeur de l'air humide par rapport à l'eau, en Pa.
e_w = pression de vapeur saturante par rapport à l'eau, en Pa.
Les valeurs de $f_w(p,T)$ sont indiquées dans des tableaux pour des valeurs de températures de 25 à 10 000 kPa et de 0 à 90 °C dans la norme AFNOR NF X 15-110.

11.1.10 Température thermodynamique du point de rosée (T_d)

Lorsqu'on refroidit l'air humide, on atteint l'état de saturation auquel apparaît la première trace d'eau sous forme de condensat.
La température thermodynamique de point de rosée T_d de l'air humide à une pression p et à un rapport de mélange r constant est la température à laquelle l'air humide est saturé par rapport à l'eau. La pression partielle de vapeur d'eau correspondant à cette température est :

$$e' = e'_w(p,T_d) = f_w(p,T_d)\,.\,e_w(T_d)$$

avec :
e' = pression de vapeur de l'air humide, en Pa.
$e'_w(p,T_d)$ = pression de vapeur de l'air humide par rapport à l'eau à la pression p et à la température de rosée T_d, en Pa.
$f_w(p,T_d)$ = facteur d'augmentation en fonction de la pression p et de la température de rosée T_d.
$e_w(T_d)$ = pression de vapeur saturante par rapport à l'eau à la température de rosée, en Pa.
La température de rosée est mesurée par les hygromètres à condensation et par les hygromètres à oxyde métalliques.

11.1.11 Humidité relative de l'air humide par rapport à l'eau (U_w)

L'humidité relative est une grandeur qui caractérise le degré de saturation en vapeur d'eau du milieu..
C'est le rapport entre la pression partielle de vapeur d'eau e' et la pression de vapeur saturante e'_w que l'air aurait s'il était saturé par rapport à l'eau, à la même pression p et à la même température T :

$$U_w = \left(\frac{e'}{e'_w}\right)_{p,T}.100 = \frac{f_w(p,T_d).e_w(T_d)}{f_w(p,T).e_w(T)}$$

D

LES MESURES D'HYGROMÉTRIE

avec :
U_w = humidité relative de l'air humide, en %.
e' = pression de vapeur de l'air humide, en Pa.
e'_w = pression de vapeur saturante par rapport à l'eau, en Pa.
$f_w(p, T_d)$ = facteur d'augmentation en fonction de la pression p et de la température de rosée T_d.

$e_w(T_d)$ = pression de vapeur saturante de l'air humide à la température de rosée T_d, en Pa.

$f_w(p, T)$ = facteur d'augmentation en fonction de la pression p et de la température ambiante T.
$e_w(T)$ = pression de vapeur saturante de l'air humide à la température ambiante T, en Pa.
L'humidité relative est mesurée par les hygromètres à variation d'impédance (capacitif ou résistif) et par les hygromètres mécaniques.

11.1.12 Température thermodynamique du thermomètre mouillé, dite température humide (T_w)

L'évaporation d'une masse d'eau dans un milieu provoque l'abaissement de la température de sa surface. Cette température s'appelle la température humide.
Plus l'air est sec, plus l'écart entre la température sèche et la température humide sera important.
Par contre, dans un air saturé en humidité, type climat tropical humide, la température sèche sera égale à la température humide car l'eau ne peut plus s'évaporer.
La température thermodynamique du thermomètre mouillé T_w de l'air humide à la pression p, à la température T et ayant le rapport de mélange r, est la température de l'air humide après qu'il ait été porté adiabatiquement à saturation par rapport à l'eau, à pression constante, la chaleur nécessaire à la vaporisation de l'eau étant prélevée sur l'air humide.
La température humide est mesurée par le psychromètre.

11.1.13 Relation entre la température humide et la température de rosée

En posant A_w, appelé coefficient psychrométrique, de valeur constante propre à l'hygromètre utilisé :

$$A_w = \frac{C_p}{\frac{M_v}{M_a} Q(T_w)} \frac{p - e'_w(T_{w,p})}{p}$$

avec :
A_w = coefficient psychrométrique de l'hygromètre utilisé.
M_v = masse molaire de la vapeur d'eau, égale à 28,964 55.10^{-3} kg/mol.
M_a = masse molaire de l'air sec, égale à 18,015 28.10^{-3} kg/mol.
Q = quantité de chaleur de vaporisation de l'eau à la température humide, en J.
$e'_w(T_{w,p})$ = pression de vapeur saturante de l'air humide par rapport à l'eau, en *Pa*

Nota

Le rapport M_v/M_a est égal à 0,621 98.

En pratique, le coefficient psychrométrique A_w dépend de la conception et de la réalisation de l'hygromètre. Cette valeur est fournie par le fabricant après son étalonnage.

On peut simplifier l'équation pour obtenir e', la pression partielle de vapeur d'eau de l'air humide (équivalente à la pression de vapeur saturante de l'air humide à la température de rosée $e'_w(T_{w,p})$) :

$$e' = e'_w(T_{d,p}) = e'_w(T_{w,p}) - A_w \cdot p \cdot (T - T_w)$$

avec :

e' = pression de vapeur de l'air humide, en Pa.

$e'_w(T_{d,p})$ = pression de vapeur saturante de l'air humide à la température de rosée à la pression p, en Pa.

$e'_w(T_{w,p})$ = pression de vapeur saturante de l'air humide par rapport à l'eau à la température humide T_w et à la pression p, en Pa.

A_w = coefficient psychrométrique de l'hygromètre utilisé.

p = pression totale de l'air humide, en Pa.

T = température de l'air humide, en K.

T_w = température humide, en K.

11.1.14 Relation entre pression de vapeur de l'air humide par rapport à l'eau (e'_w) et rapport de mélange (r)

L'air humide étant un mélange d'air sec et de vapeur d'eau qui peut considérer comme des gaz parfaits, nous pouvons appliquer la loi de Dalton :

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T$$

avec :

p = pression totale de l'air humide, en Pa.

V = volume de l'air humide, en m^3.

m = masse totale de l'air humide à la température T, en kg.

M = masse molaire de l'air humide, en kg/kmol.

R = constante des gaz parfaits, 8 320 J/kmol^{-1}.K^{-1}.

T = température de l'air humide, en K.

Cette équation peut aussi s'écrire : $m = \frac{p \cdot V \cdot M}{R \cdot T}$

Nous avons vu plus haut que le rapport de mélange r est défini par :

$$r = \frac{m_v}{m_a}$$

avec :

r = rapport de mélange.

m_v = masse de vapeur d'eau, en kg.

m_a = masse de l'air sec, en kg.

Les valeurs de V, de T et de R étant constantes dans un mélange donné, l'équation de r peut s'écrire :

$$r = \frac{M_v}{M} \cdot \frac{e'_w}{p}$$

avec :
M_v = masse molaire de la vapeur d'eau, égale à 28,96455.10^{-3} kg/mol.
M = masse molaire de l'air humide, égale à 18.10^{-3} kg/mol .
$e'_w(T_{d,p})$ = pression de vapeur saturante de l'air humide à la température de rosée à la pression p, en Pa.
p = pression de l'air humide, en Pa.

D'où, l'application numérique pour une pression atmosphérique de 101 325 Pa :

$$r = \frac{18}{29} \cdot \frac{e'_w}{101325}$$

$$\Rightarrow r = 0,612.10^{-5} e'_w$$

$$\Leftrightarrow e'_w = 163245.r$$

Tableau 9.1 – Correspondance entre température, pression de vapeur saturante et rapport de mélange de l'air humide

Température de l'air humide (° C)	Pression de vapeur saturante e'_w (Pa)	Rapport de mélange r (kg/kg as)	Température de l'air humide (° C)	Pression de vapeur saturante e'_w (Pa)	Rapport de mélange r (kg/kg as)
0	610,70	0,00374	41	7 776,30	0,04764
1	656,60	0,00402	42	8 197,30	0,05021
2	705,50	0,00432	43	8 637,90	0,05291
3	757,60	0,00464	44	9 098,80	0,05574
4	813,10	0,00498	45	9 580,70	0,05869
5	872,10	0,00534	46	10 084	0,06177
6	934,90	0,00573	47	10 610	0,06499
7	1 001,60	0,00614	48	11 160	0,06836
8	1 072,40	0,00657	49	11 734	0,07188
9	1 147,70	0,00703	50	12 333	0,07555
10	1 227,50	0,00752	51	12 959	0,07938
11	1 312,20	0,00804	52	13 611	0,08338
12	1 401,90	0,00859	53	14 291	0,08754
13	1 497,10	0,00917	54	15 000	0,09189
14	1 597,80	0,00979	55	15 739	0,09641
15	1 704,50	0,01044	56	16 509	0,10113
16	1 817,30	0,01113	57	17 311	0,10604
17	1 936,70	0,01186	58	18 145	0,11115
18	2 062,80	0,01264	59	19 014	0,11647
19	2 196,20	0,01345	60	19 918	0,12201
20	2 387,00	0,01462	61	20 859	0,12778
21	2 485,60	0,01523	62	21 837	0,13377
22	2 642,50	0,01619	63	22 853	0,13999
23	2 807,90	0,01720	64	23 910	0,14647
24	2 982,30	0,01827	65	25 008	0,15319
25	3 166,10	0,01939	66	26 148	0,16018
26	3 359,70	0,02058	67	27 332	0,16743
27	3 563,60	0,02183	68	28 562	0,17496
28	3 778,20	0,02314	69	29 837	0,18277
29	4 003,90	0,02453	70	31 161	0,19088
30	4 241,30	0,02598	71	32 534	0,19929
31	4 490,80	0,02751	72	33 958	0,20802
32	4 753,00	0,02912	73	35 434	0,21706
33	5 028,40	0,03080	74	36 963	0,22643
34	5 317,50	0,03257	75	38 548	0,23613
35	5 620,90	0,03443	76	40 190	0,24619
36	5 939,30	0,03638	77	41 891	0,25661
37	6 273,10	0,03843	78	43 651	0,26739
38	6 623,10	0,04057	79	45 474	0,27856
39	6 989,80	0,04282	80	47 360	0,29011
40	7 374,00	0,04517			

E

Les mesures de pression

12 • LES MOYENS DE MESURAGE

La présente partie concerne plus particulièrement la mesure de pression statique pariétale, c'est-à-dire le mesurage de la pression effectué au niveau de la paroi contenant le fluide sous pression.
La pression est le quotient d'une force par une surface mais aussi l'expression d'un travail sur un volume :

$$P = \frac{F}{S} = \frac{N}{m^2} = \frac{N.m}{m^3} = \frac{J}{m^3}$$

avec :
P = pression, en Pa.
F = force, en Newton.
S = surface, en m^2.
J = travail, en Joules.

Il y a trois manières d'exprimer la pression selon le référentiel choisit :

– la pression relative (aussi appelée pression effective) : c'est la pression mesurée par rapport à la pression ambiante, qui est le plus souvent la pression atmosphérique. Si c'est le cas, il faut bien considérer que la pression atmosphérique varie en fonction des conditions météorologiques et de la situation géographique (comme expliqué ci-dessous), ce qui entraîne des incertitudes de mesure supplémentaires.

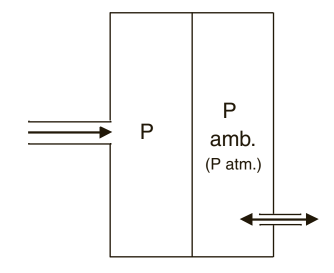


Figure 12.1 – Mesure de la pression relative (ou effective)

– la pression absolue : c'est la pression mesurée par rapport au vide parfait, dit aussi « absolu ». Dans le cas des manomètres à pression absolue, appelé « vacuomètre », la pression lue sera comparée à la pression absolue qui a été créée dans une chambre de référence incluse dans le capteur. La pression mesurée est toujours inférieure à la pression atmosphérique, mais reste positive. Pratiquement, exprimée en bar, on considère :

pression absolue = pression relative + 1, 013 25

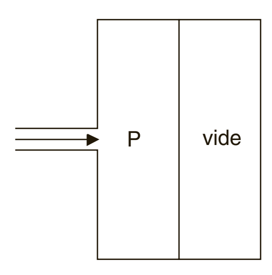


Figure 12.2 – Mesure de la pression absolue

– la pression différentielle : c'est la différence entre deux pressions. Cette ΔP se calcule entre deux pressions statiques ou est mesurée directement par un manomètre différentiel. La pression différentielle est généralement indépendante de la pression atmosphérique lors des mesurages dans le domaine du génie climatique.

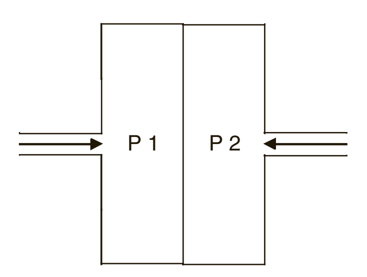


Figure 12.3 – Mesure de la pression différentielle

L'unité légale du Système international SI est le Pascal (Pa) : 1 Pa = 1 N/m^2 = 1 J/m^3.
On utilise parfois le bar : 1 bar = 10^5 Pa et 1 mbar = 10^{-3} bar = 10^2 Pa.
D'autres unités non SI sont parfois encore utilisées :

– 1 kg/cm^2 = 0,98.10^5 Pa.
– 1 atm = 1,013.10^5 Pa.
– 1 mmHg (mercure) = 133,3 Pa.
– 1 mmH_2O (eau) = 9,81 Pa.

On trouvera au chapitre 14.2 un tableau de correspondance entre les unités de pression les plus utilisées.
Dans le domaine du génie climatique, on sera amené à mesurer des pressions très différentes. Pour les réseaux aérauliques, le résultat du mesurage sera généralement de l'ordre de 10^2 à 10^3 Pa, tandis que pour un réseau hydraulique, le résultat pourra être de l'ordre de 10^6 Pa, soit un rapport de 1 à 1 000 voire 10 000 qui nécessitera des matériels de mesure avec des plages de fonctionnement très différentes.
Cela nécessitera aussi l'utilisation sur site de matériel adapté, notamment pour les réseaux sous pressions où les simples manomètres à hauteur de liquide ne suffiront plus, même en utilisant des fluides de forte densité (le mercure qui présentait la densité la plus élevée avec 13,50 kg/dm^3 ne peut plus être employé).
Une attention particulière est à apporter à la pression que nous percevons au quotidien au-dessus de nous, c'est la pression atmosphérique. C'est une grandeur physique qui correspond à la pression exercée par la couche d'air autour de la terre, sous l'action de la pesanteur. Elle est égale à 101 325 Pa à 0 °C au niveau de

la mer, mais elle varie en fonction de l'altitude. Exprimée en unité « météorologique », elle varie de 1 013 mbar à + 30 mbar et – 40 mbar près.
L'accélération de la pesanteur retenue en France est de 9,806 65 m/s². Mais c'est une moyenne car elle peut varier sur le globe terrestre en fonction de l'altitude (équation 1) et de la position par rapport à l'équateur (équation 2) :

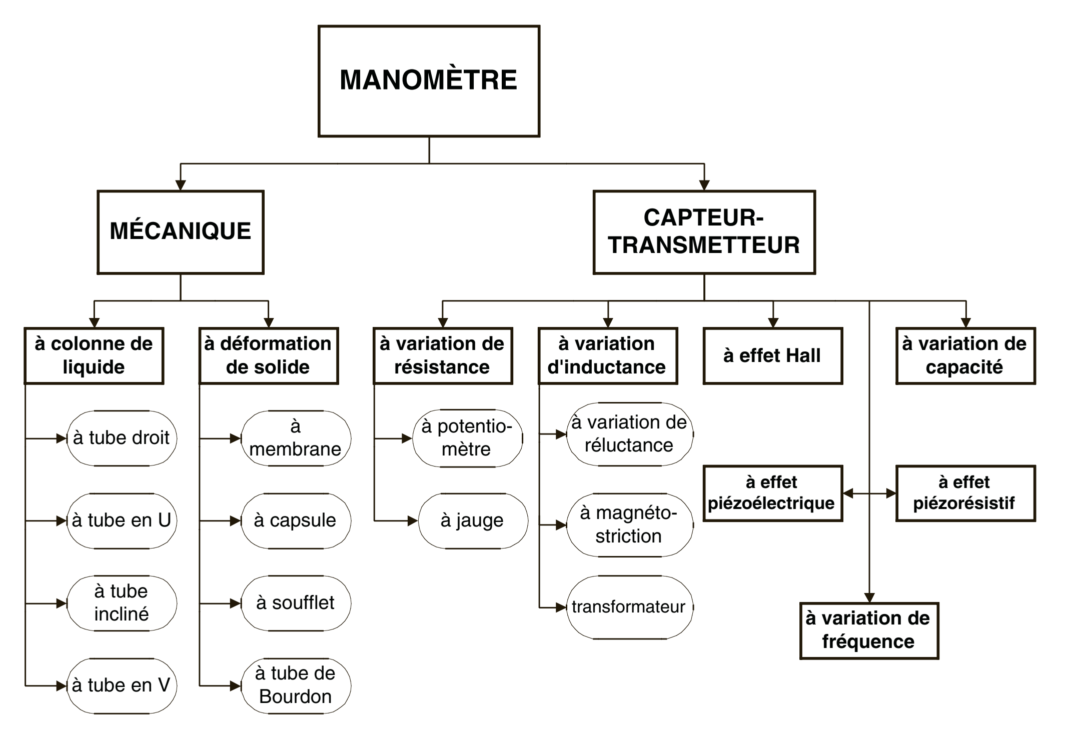
$$(1)\ g = g_0\left(\frac{R_0}{R_0 + z}\right)^2$$

avec :
g_0 = valeur de la pesanteur g au niveau de la mer.
R_0 = rayon de la terre, égal à $6{,}4.10^6$ m .
z = altitude, en mètre.

$$(2)\ g = 9{,}780\ 39\ (1 + 0{,}005\ 294\ \sin^2\theta)$$

avec :
θ = angle par rapport à l'équateur (0° à l'équateur et 90° aux pôles).

En matière de mesurage de pression, on distingue deux grandes familles de manomètres suivant la technologie utilisée :
– les manomètres mécaniques ;
– les capteurs et les transmetteurs.



Synoptique récapitulatif
des principaux types de manomètre

12.1 Les manomètres mécaniques

12.1.1 Principe de fonctionnement des manomètres à colonne de liquide

On utilise couramment des manomètres à colonne de liquide pour mesurer de faibles pressions relatives, voire des dépressions.
Avec ce type d'instrument, la pression mesurable ne peut guère dépasser 2 bars, soit 2.10^5 Pa.

■ Le tube droit

Dans le cas de mesure basique par manomètre à colonne, on lira la hauteur de liquide directement sur le tube à colonne et on calculera la pression p de la façon générale indiquée ci-dessus :

$$p = \rho \cdot h \cdot g$$

avec :
p = pression mesurée, en Pa.
ρ = masse volumique du fluide du manomètre, en kg/m^3.
h = hauteur de liquide dans la colonne, en m.
g = force de pesanteur, égale en France à 9,806 65 m/s^2.
A titre d'exemple, la valeur de ρ est très différente selon les fluides, exprimée à 20 °C :

– alcool éthylique : densité = 0,80 kg/dm^3 ;
– toluène : densité = 0,864 kg/dm^3 ;
– benzène : densité = 0,879 kg/dm^3 (généralement de couleur rouge) ;
– eau densité ≈ 1 kg/dm^3 ;
– nitrobenzène = 1,20 kg/dm^3 ;
– type Volt 1S = 1,86 kg/dm^3 (généralement de couleur bleu) ;
– tétrabromure d'acéthylène = 2,96 kg/dm^3 (généralement de couleur jaune) ;
– mercure = 13,545 kg/dm^3 (de couleur gris métal mais maintenant inutilisé pour des raisons de pollution et de toxicité).



Figure 12.4 – Manomètre droit (doc. KIMO)

Nota

Il convient de remplacer périodiquement les liquides exposés aux ultraviolets car ceux-ci ont la propriété de dénaturer le fluide, voire de le rendre transparent à terme.

La lecture de la pression doit se faire en fonction de la forme du ménisque liée à la nature du fluide utilisé dans le tube lui-même.
On peut remarquer que les forces capillaires s'exercent différemment selon qu'il s'agisse d'eau ou de benzol (ménisque concave) ou de mercure (ménisque convexe).
La lecture doit se faire au niveau de l'attache du liquide sur le bord du tube (Figure 12.5).
Au voisinage de la paroi du tube, il se forme un ménisque sous l'effet de la capillarité. Ce phénomène revêt une importance particulière avec les tubes de diamètre inférieur à 8 mm. La forme concave (cas de l'eau) ou convexe du ménisque (cas du mercure) dépend aussi de la propriété de mouillage du liquide utilisé.

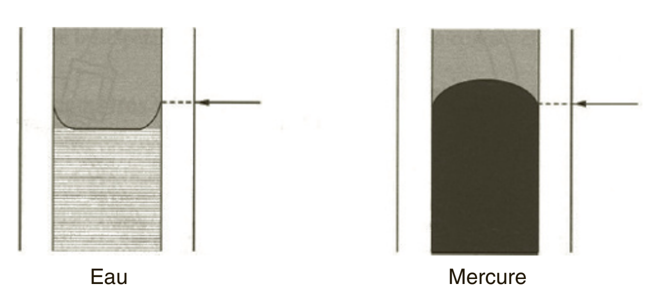
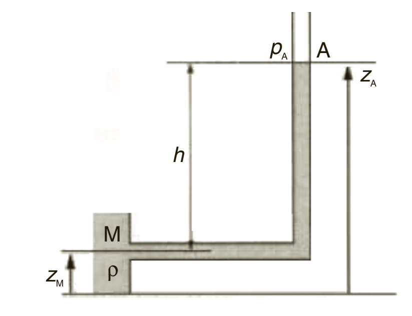


Figure 12.5 – Lecture du ménisque (doc. Dunod)

■ Le tube en U, ou tube piézométrique

Le tube piézométrique (du grec *piezein*, presser), est utilisé pour mesurer les faibles pressions de fluide. Son fonctionnement se rapproche du tube droit mais avec une composante supplémentaire correspondant à la surface de référence Z_M.

Figure 12.6 – Tube piézométrique (doc. TI)



En état d'équilibre, on a :

$$p_M + \rho g z_M = p_A + \rho g z_A$$

avec :
p_M = pression au point de référence M.
ρ = masse volumique du fluide.
g = force de pesanteur.
z_M = hauteur de liquide au point M.
p_A = pression atmosphérique.
z_A = hauteur de liquide au point A.
$z_A - z_M = h$ = la pression relative.
d'où :

$$p_M - p_A = \rho g(z_A - z_M) = \rho g h$$
$$p_M - p_A = \rho g h$$

■ Le tube incliné et le tube en V

Sur le même principe que le tube en U, en utilise aussi dans le domaine du génie climatique le tube incliné et le tube en V sur les installations de conditionnement d'air, de ventilation, de dépoussiérage,…, pour des mesurages allant jusqu'à 1 000 Pa (100 mmce).

L'inclinaison du tube permet d'obtenir une meilleure sensibilité. Par rapport à une forme de tube verticale, la mesure est augmentée.
Si on appelle α l'angle formé par le tube par rapport à l'horizontale, et h la hauteur manométrique, la longueur L de graduation sera plus importante (car $\sin \alpha < 1$) :

$$L = \frac{h}{\sin\alpha}$$

Exemple :

– pour un angle α de 45°, la longueur L sera 1,41 fois la hauteur h car $\sin\alpha = 0{,}707$;
– pour un angle α de 30°, la longueur L sera le double de la hauteur h car $\sin\alpha = 0{,}50$.

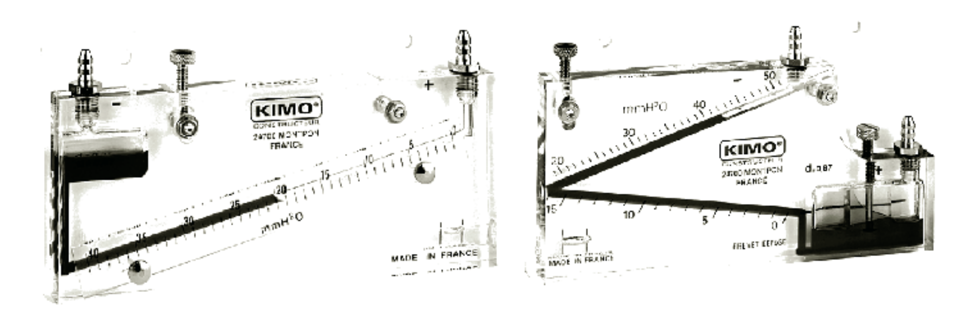


Figure 12.7 – Manomètres à tube incliné (doc. KIMO)

La lecture du ménisque se fait comme décrit précédemment.

12.1.2 Principes de fonctionnement des manomètres à déformation de solide

Un élément intermédiaire est utilisé entre le fluide et le mécanisme indicateur. Le choix de la forme de l'élément intermédiaire dépend principalement de l'étendue de la mesure à effectuer.

■ Le manomètre à membrane

Une membrane circulaire ondulée est l'élément intermédiaire entre le fluide et le mécanisme à aiguille (figure 12-8). La relative souplesse de la membrane permet une déformation sans mémoire de forme et meilleure linéarité dans le signal qu'une membrane plane.
L'inconvénient de la membrane réside dans sa dilatation en fonction de la température du fluide.
L'erreur de mesure que l'on peut attendre est de l'ordre de 1,5 % à 3 % de l'échelle de mesure.

■ Le manomètre à capsule

La capsule forme une enveloppe dans laquelle la pression du fluide s'exerce. En fonction de sa forme ondulée, le mouvement de la paroi supérieure transmet un déplacement au système indicateur (figure 12.9).

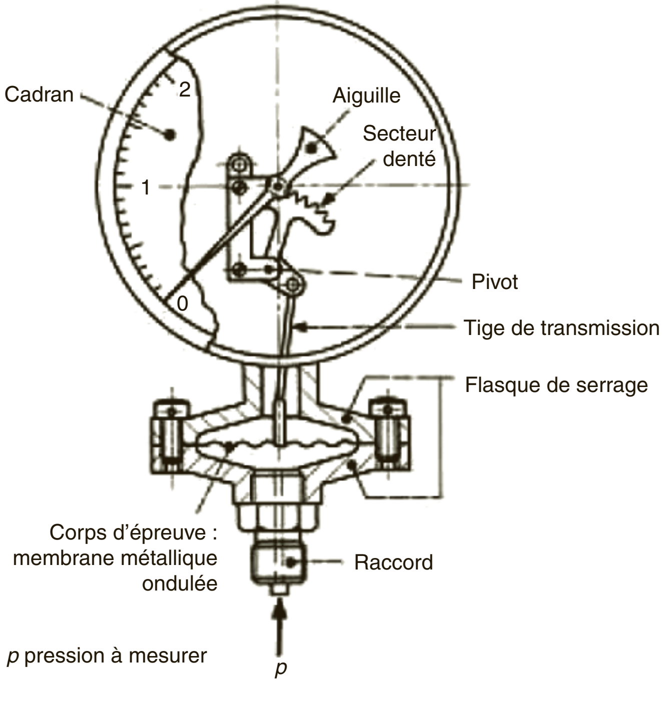


Figure 12.8 – Manomètre à membrane
(doc. T.I.)

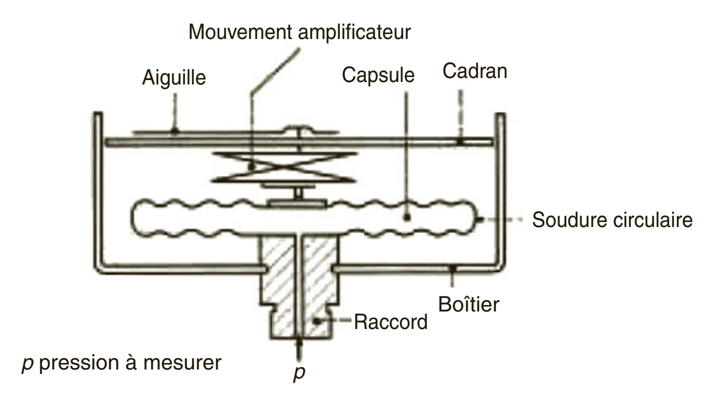


Figure 12.9 – Manomètre à capsule
(doc. T.I.)

■ Le manomètre à soufflet

La pression du fluide s'exerce sur un tube ondulé à l'intérieur duquel un ressort empêche l'écrasement complet et assure le retour à la position nominale (figure 12.10). Un levier mécanique transmet le déplacement à l'aiguille. La réponse est à peu près linéaire.

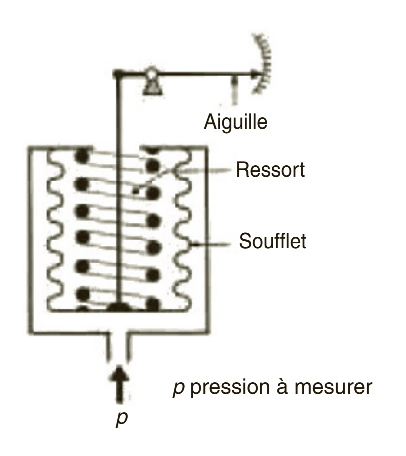


Figure 12.10 – Manomètre à soufflet (doc. T.I.)

■ Le manomètre à tube de Bourdon

C'est sans doute le manomètre le plus ancien. Du nom de son inventeur (Eugène BOURDON, ingénieur français, né en 1808 et décédé en 1884), ce manomètre utilise la déformation d'un tube cintré en forme de C (voire même en forme de spirale, en hélice ou torsadé) fixé à une extrémité est ouverte sur le fluide, et dont l'autre est reliée à un mécanisme à aiguille (figure 12.11).

Le cintrage du tube ayant provoqué un allongement de la face externe et un raccourcissement de la face interne, la poussée du fluide tend à le redresser. La force exercée est proportionnelle à la pression et la propriété élastique du métal permet une contrainte régulière.

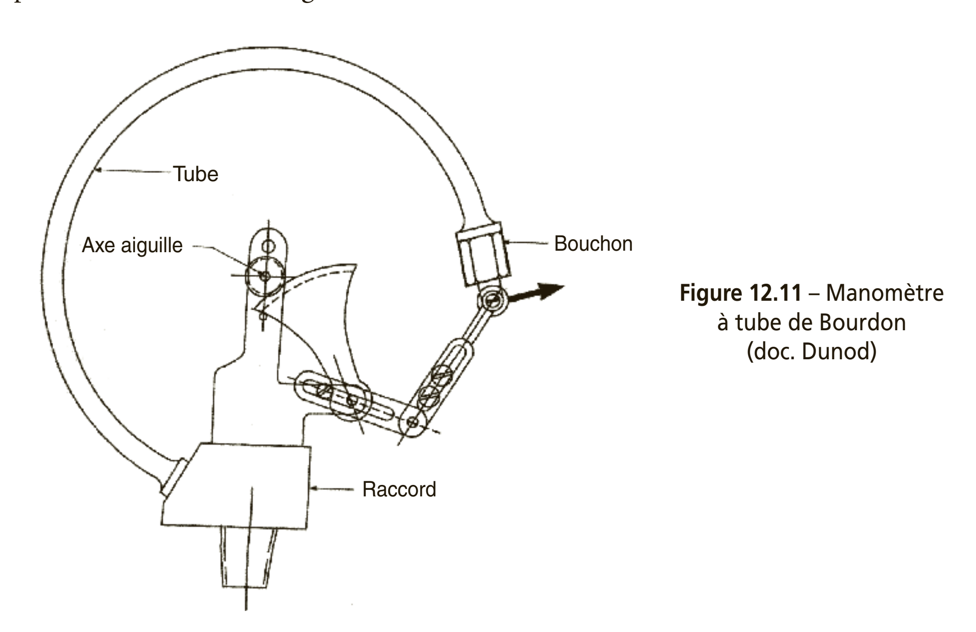


Figure 12.11 – Manomètre à tube de Bourdon (doc. Dunod)

Il est recommandé de ne pas utiliser en permanence ce type de manomètre à plus de 3/4 de l'échelle de mesure.

12.2 Les capteurs-transmetteurs

À la différence des manomètres mécaniques qui indiquent la valeur de la pression mesurée sur un cadran, les capteurs et les transmetteurs exploitent l'information sous forme de signal électrique.

Le capteur de pression comprend l'élément mécano-détecteur appelé « senseur » qui est composé du corps d'épreuve et du détecteur.

Le transmetteur conditionne le signal reçu par le senseur et le transforme en signal normalisé.

Le détecteur peut être actif ou passif.

– actif lorsqu'il se comporte en générateur d'électricité et qu'il met en jeu une transformation d'énergie. Par exemple, le détecteur piézoélectrique.
– passif lorsque le détecteur est une résistance, une inductance ou une capacité qui varie sous l'influence de la grandeur physique à mesurer. Cette impédance est insérée dans un circuit alimenté en électricité. On utilise souvent le montage en pont de Wheatstone (voir le détail de fonctionnement au chapitre 14).

Par raccourci de langage dans le domaine du génie climatique, on parle souvent de « capteur-transmetteur », ce qui regroupe à la fois la fonction « prise d'information » et la fonction « transmission » de cette donnée par un seul équipement de mesure.

On distingue les capteur-transmetteur analogiques et les capteur-transmetteurs numériques :

– le circuit de traitement analogique a pour but d'amplifier et de filtrer le signal pour l'exploiter avec un cadran à aiguille ou avec un autre système type oscilloscope, et pour être parfois enregistré ;
– le circuit de traitement numérique a pour but de transformer le signal en image pour qu'elle soit affichée sur un écran sous forme numérique.

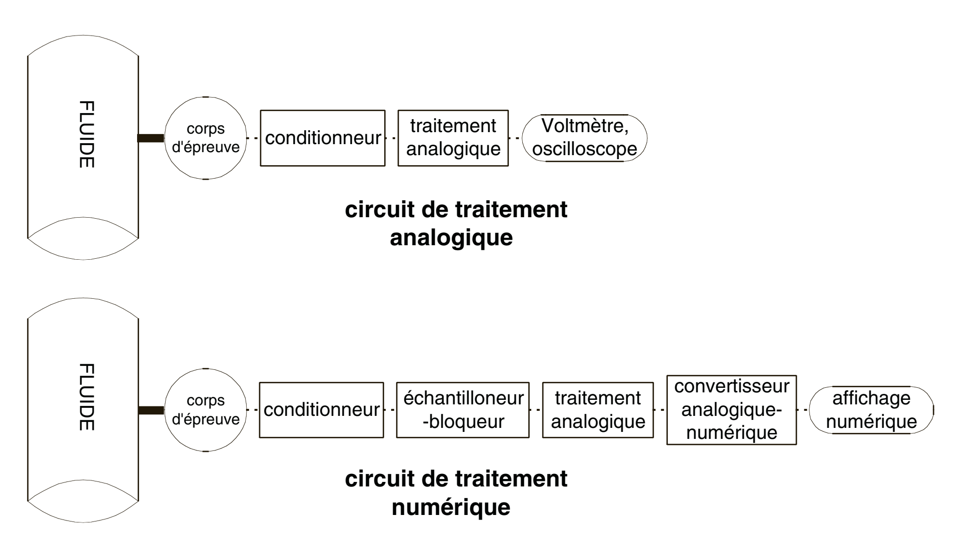


Figure 12.12 – Circuit de traitement analogique et circuit de traitement numérique

Le corps d'épreuve qui constitue l'interface mécanique entre le fluide et le détecteur est généralement de forme circulaire, quelquefois en forme de poutre, et réalisé en alliage d'aluminium, en acier inox, en silicium ou en céramique à base d'alumine, ou autre pour les cas particuliers de capteurs piézoélectriques (voir ci-après).
On retient l'un plutôt qu'un autre en fonction de la souplesse et de la résistance mécanique que l'on souhaite, ou des propriétés intrinsèques du produit.

12.2.1 Principes de fonctionnement des capteurs et transmetteurs à variation de résistance

Le potentiomètre

Le potentiomètre est une résistance constituée d'un fil ou d'une piste conductrice chargée de poudre de métal. Il peut être de forme circulaire (voir figure ci-dessous) ou rectiligne.
La pression qui déforme la capsule agit ainsi sur le curseur qui se déplace sur le potentiomètre. Le mouvement du curseur est plus ou moins important selon la démultiplication de la spirale reliée directement au corps de mesure de la pression. Le capteur est alimenté en courant depuis le secteur ou en courant continu.

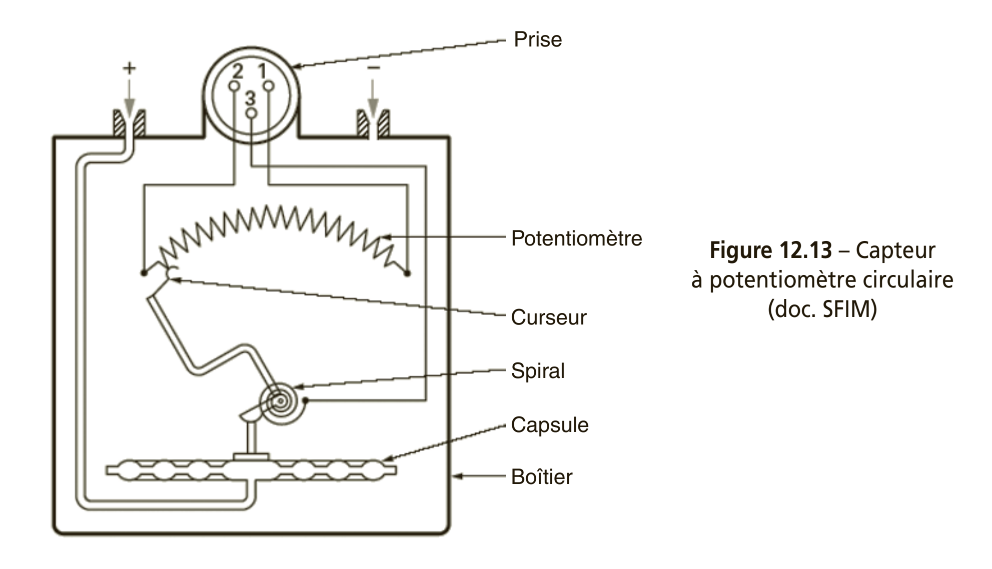


Figure 12.13 – Capteur à potentiomètre circulaire (doc. SFIM)

Le potentiomètre est sujet une hystérésis pouvant atteindre 1 % mais peut avoir une résolution inférieure à 0,05 % suivant les constructeurs.

Les jauges

Les jauges sont constituées d'élément métallique ou semi-conducteur qui comme propriété principale d'avoir une résistance qui varie en fonction de leur déformation.
Le circuit de mesure comporte un pont de Wheatstone qui comporte des circuits de compensation pour pallier les imperfections de montage et d'utilisation (longueurs de fils, températures,…) (voir au chapitre 14.1 le fonctionnement d'un pont de Wheatstone).

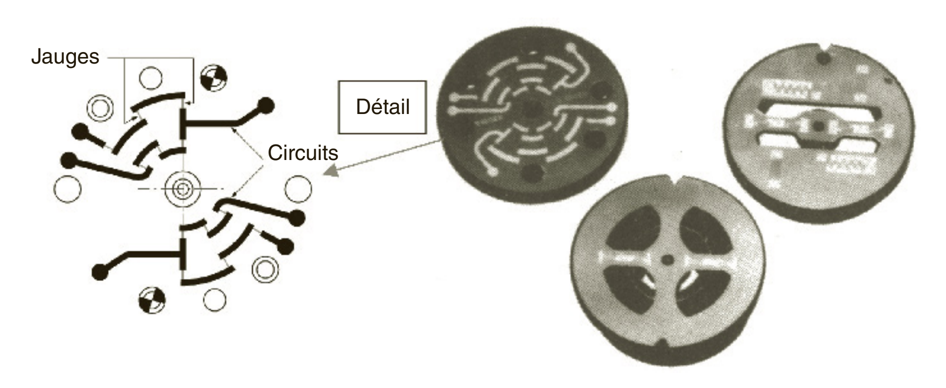


Figure 12.14 – Exemple de jauge sur couche métallique (doc. d'après T.I.)

12.2.2 Principes de fonctionnement des capteurs et transmetteurs à variation d'inductance

■ Les détecteurs à variation de réluctance

On entend par réluctance la variation de l'auto-induction d'un circuit magnétique créée par le déplacement d'un détecteur. Dans le cas d'un manomètre, il s'agit de la variation respective des champs magnétique de deux bobines séparées par le corps d'épreuve que constitue une plaque soumise à une pression sur chaque face (Figure 12.15).

Lorsque la plaque se déforme en raison d'un différentiel de pression, le champ magnétique de la bobine L1 varie ainsi que celui de la bobine L2. Les variations d'impédance déséquilibre alors le pont de mesure et le signal de mesure peut être exploité après traitement.

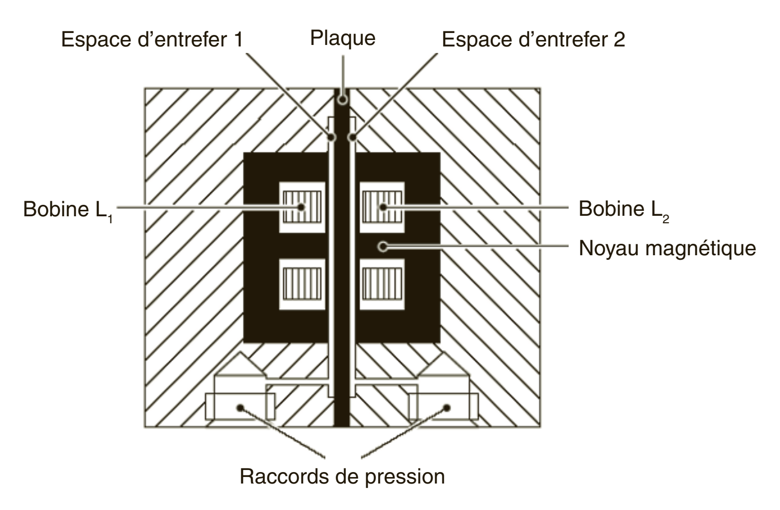


Figure 12.15 – Exemple de capteur à variation de réluctance (doc. Validyne)

■ **Les détecteurs à magnétostriction**

Pour mémoire, on peut aussi citer les détecteurs à magnétostriction qui utilisent la variation d'inductance de corps d'épreuve soumis à un champ magnétique (modification de nature géométrique ou modification mécanique). Ils sont généralement réalisés en nickel, en alliage fer-nickel.

■ **Les détecteurs à transformateur LVDT**

Les transformateurs LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) fonctionnent comme un capteur de déplacement qui comporte un noyau situé entre un enroulement primaire et deux enroulements secondaires.

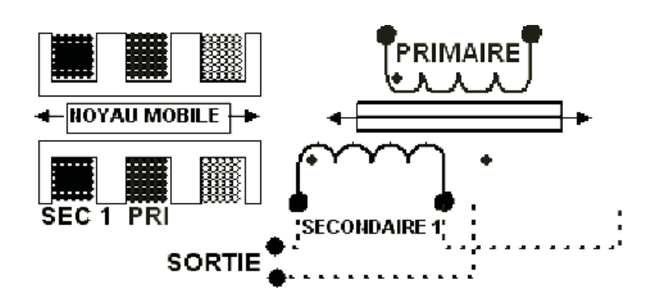


Figure 12.16 – Principe de fonctionnement du transformateur LVDT (doc. Aviatechno)

Lorsque le noyau se déplace sous l'effet de la pression exercée sur le corps d'épreuve, la tension induite dans une des bobines du secondaire, où se trouve le noyau, augmente. Simultanément, l'autre bobine du secondaire voit sa tension décroître. Cela produit une tension différentielle variable linéairement en fonction de la position du noyau.

12.2.3 Principe de fonctionnement des capteurs et transmetteurs à effet Hall

Le fonctionnement de ce capteur repose sur la propriété qu'ont certains matériaux conducteurs ou semi-conducteurs, lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique perpendiculaire au passage du courant, de générer une tension sur leurs faces opposées, appelée « tension de Hall » (du nom de son découvreur, Edwin Herbert HALL, physicien américain, né en 1855, décédé en1938).
Si un courant I_0 traverse le barreau conducteur et si un champ magnétique d'induction B est appliqué perpendiculairement au sens de passage du courant, les électrons sont déviés par le champ magnétique et une tension V_h, proportionnelle à la fois au champ magnétique et au courant I_0, apparaît sur les faces latérales du barreau.

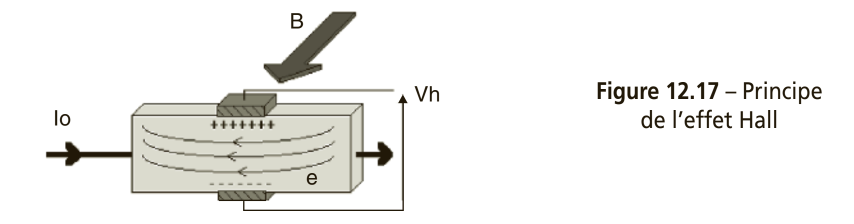


Figure 12.17 – Principe de l'effet Hall

En application dans le domaine du génie climatique, on rend généralement un aimant solidaire du corps d'épreuve qui se déplace devant l'élément conducteur fixe parcouru par un courant, et la tension (de Hall) est alors proportionnelle à la force exercée sur le corps d'épreuve et aux composantes d'induction et de courant.

12.2.4 Principe de fonctionnement des capteurs et transmetteurs à variation de capacité

Le fonctionnement de ce capteur est basé sur la variation de capacité d'un condensateur lorsqu'une pression fait se déplacer une armature mobile fixée au corps d'épreuve. En fonction de la distance entre cette armature et celle qui est fixe, et de la surface de recouvrement, la capacité du condensateur ainsi formé varie et est transformée en signal.

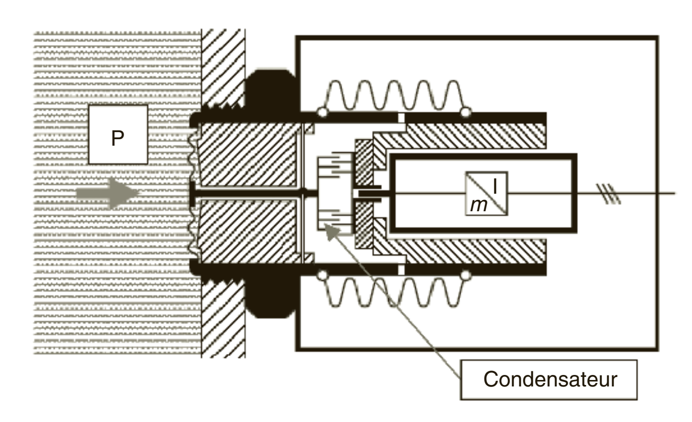


Figure 12.18 – Exemple de capteur à variation de capacité (d'après doc. Vega)

12.2.5 Principe de fonctionnement des capteurs et transmetteurs à effet piézoélectrique

Le capteur piézoélectrique est constitué d'un disque pressé entre deux électrodes, de la même manière qu'un condensateur. Le disque est réalisé dans un matériau qui possède une structure cristalline variable en fonction de sa déformation et dont le déplacement génère une tension. Il est nécessaire d'amplifier le signal de sortie pour pouvoir l'exploiter.

Le phénomène de piézoélectricité provient de l'apparition d'une polarisation électrique « naturelle » dans certains matériaux diélectriques anisotropes naturels (quartz, tourmaline…) ou artificiels (quartz de synthèse, céramique traitée, sulfate de lithium…) lorsqu'ils subissent une déformation (pression, vibrations, accélération…).

Sous l'effet de la déformation, il apparaît des charges de signes contraires sur les électrodes opposées et donc une différence de potentiel proportionnelle à la force appliquée.

A contrario, créer un champ électrique entre les électrodes déforme le capteur diélectrique. L'effet piézoélectrique est réversible.

12.2.6 Principe de fonctionnement des capteurs et transmetteurs à effet piézorésistif

On rencontre aussi des capteurs piézorésistifs. Le principe de fonctionnement est le même que le piézoélectrique décrit ci-dessus mais cette fois, c'est la variation de résistance d'une membrane proportionnelle à la déformation qui est exploitée. La membrane est généralement réalisée en silicium (figure 12.20 ci-après).

12.2.7 Autres principes de fonctionnement

On peut aussi citer pour mémoire les capteurs à variation de fréquence, les capteurs à flux lumineux et les manomètres à zéro asservi mais dont l'utilisation dans le domaine du génie climatique est très exceptionnelle.



Figure 12.19 – capteur de pression à élément résistif portable (doc. KIMO)



Figure 12.20 – Capteur de pression à élément résistif (d'après doc. KIMO)

13 • LES MÉTHODES DE MESURAGE

Si la pression est la même au sein d'un volume de gaz au repos, il n'en est pas de même avec un fluide en mouvement. La position et la forme du manomètre, appelé « capteur de pression » d'une manière générique, revêtent une importance particulière qui a fait l'objet de beaucoup d'études. Nous exposons ci-après les principales caractéristiques à observer.

13.1 Caractéristiques du capteur

13.1.1 Position

Pour un fluide en mouvement, la position du capteur de pression statique est importante. Il faut que le corps d'épreuve soit positionné de manière à affleurer le plus possible la paroi de la conduite. Cette position pariétale permet d'éviter les mesures de pression aléatoires provoquées par les perturbations au niveau de l'élément sensible.

On peut lire sur le graphique ci-dessous l'influence de position en retrait ou en saillie.

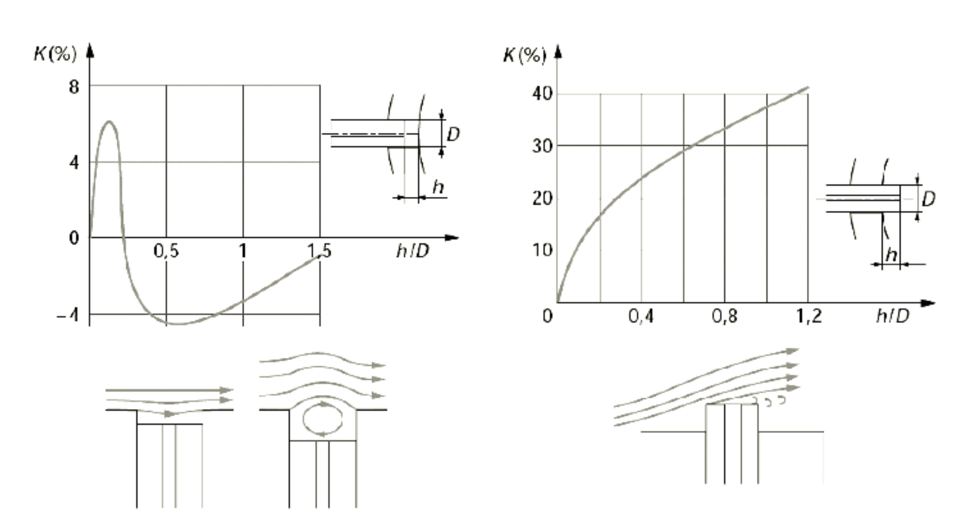


Figure 13.1 – Coefficient d'erreur *K* dû à la position de la prise de pression (doc. T.I.)

Le coefficient d'erreur K correspond à l'erreur de mesure exprimée par :

$$K = \frac{2(p - p_0)}{\rho V^2}$$

avec :
K = coefficient d'erreur, en %.
p = pression réelle dans la conduite, en Pa.
p_0 = pression mesurée par le capteur, en Pa.
ρ = masse volumique du fluide, en kg/m^2.
V = vitesse du fluide, en m/s.

13.1.2 Diamètre de la prise de pression

La dimension de l'orifice mettant en contact le fluide et l'élément sensible du capteur est aussi un paramètre important pour limiter les sources d'erreur de mesure. Les recherches menées à ce jour permettent de préciser que la dimension minimale devrait être de 3,8 mm.

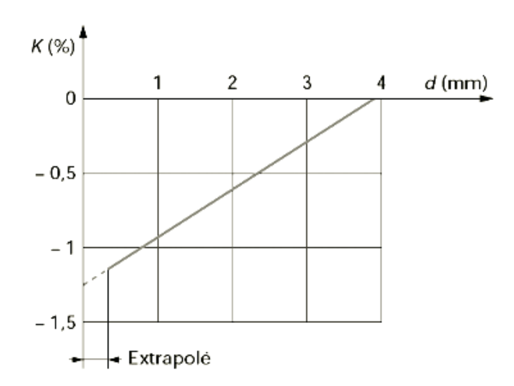


Figure 13.2 – Coefficient d'erreur K dû au diamètre de la prise de pression (doc. T.I.)

Pour un diamètre de 3,8 mm, l'erreur supplémentaire tend vers 0. Pour des diamètres inférieurs, l'erreur peut être de – 0,5 % pour un diamètre de 2,3 mm.

13.1.3 Forme du piquage

Le piquage sur la canalisation influe sur la valeur de la pression mesurée dans un fluide en mouvement. Selon que les bords d'attaque soient aigus ou arrondis, l'erreur de mesurage sera plus ou moins importante.

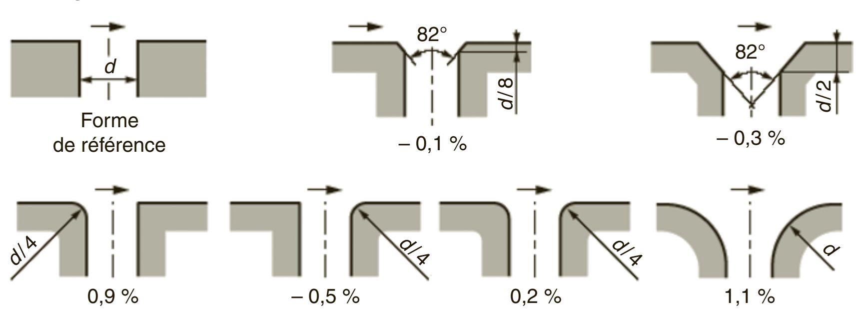


Figure 13.3 – Coefficient d'erreur dû à la forme du piquage de la prise de pression (doc. T.I.)

E

LES MESURES DE PRESSION

13.1.4 Orientation

L'orientation du capteur par rapport au sens du fluide influe sur la précision de la mesure. Le graphe ci-dessous résume les résultats obtenus par les recherches sur ce sujet avec un orifice de capteur de 3,8 mm suivant son inclinaison.

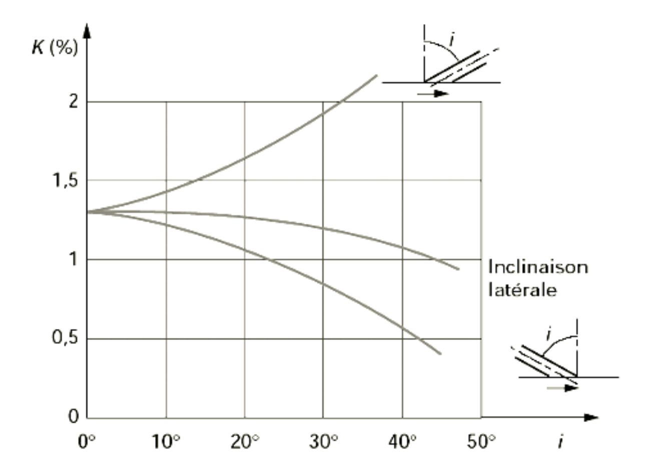


Figure 13.4 – Coefficient d'erreur *K* dû à l'inclinaison de la prise de pression (doc. T.I.)

Dans le cas de prise de pression avec un tube de Pitot, la position de l'axe de la hampe par rapport à l'axe de la veine du fluide est relativement importante. Une inclinaison entre les deux peut entraîner des erreurs de mesurage pouvant dépasser 0,1 %.

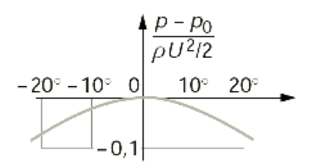


Figure 13.5 – Coefficient d'erreur *K* dû à l'inclinaison de la hampe d'un tube de Pitot (doc. T.I.)

13.2 Précautions d'emploi

Les conditions environnementales dans lesquelles les capteurs de pression sont amenés à fonctionner peuvent perturber le mesurage. Les recommandations ci-dessous concernent surtout les problématiques mécaniques rencontrées dans le domaine des installations classique de génie climatique. Les contraintes d'ordre magnétique ou en atmosphère explosive pourront être consultées dans les ouvrages spécialisés.

13.2.1 Mise en place

Il est recommandé de placer les manomètres « capteur de pression » verticalement sur la canalisation car cela correspond le plus souvent à la position d'étalonnage.

D'autre part, les manomètres mécaniques contiennent souvent de l'huile de glycérine à l'intérieur du corps pour amortir les vibrations de l'aiguille et la position verticale limite aussi les fuites par le bouchon de remplissage.

Pour une maintenance aisée, la pose d'une vanne d'isolement permettra le démontage du capteur sans vidange de l'installation. Ce robinet à 3 voies permet aussi de « casser » la pression dans le cas du manomètre mécanique à aiguille afin de ne pas fatiguer inutilement le mécanisme entre deux mesurages.
Par contre, cela perturbe la précision du mesurage comme vu précédemment en raison de l'éloignement que cette vanne crée par rapport à la veine de fluide.



Figure 13.6 – Robinet porte-manomètre à 3 voies (doc. CGR)

13.2.2 Vibrations

En présence de vibrations parasites sur les canalisations, il est préférable de prévoir un système pour éviter leurs transmissions au corps du capteur.
La mise en place d'un élément de tuyauterie en forme de « queue de cochon » permet de limiter les vibrations tout en diminuant aussi l'impact d'éventuelles vibrations dues à des coups de bélier.
Ce dispositif est couramment utilisé car il permet aussi de limiter les phénomènes de conductivité thermique et de rayonnement éventuels de la tuyauterie, et utilise le phénomène de condensation pour créer un siphon de liquide.



Figure 13.7 – Porte-manomètre en « queue de cochon » (doc. CGR)

13.2.3 Températures

Il est recommandé de mettre en place des équipements correspondants à la plage de température du fluide prévue par les fabricants. En cas d'impossibilité, l'interposition d'un élément de tuyauterie permet de maintenir une distance suffisante pour éviter le rayonnement et éventuellement les condensations sur le capteur.
Lors de mesurage de pression sur un réseau vapeur, on place généralement un élément de tuyauterie en forme de boucle qui forme une garde d'eau permettant

de faire une zone tampon. La condensation de la vapeur dans ce siphon diminue ainsi la température du fluide directement en contact avec la membrane sans pour autant nuire beaucoup à la précision du mesurage.



Figure 13.8 – Porte-manomètre en siphon (doc. CGR)

13.2.4 Amortissement

L'amortissement le plus utilisé pour les manomètres à cadran est l'huile de glycérine qui remplit le corps de l'instrument. Cela évite la fatigue mécanique et permet une lecture plus facile des mesures.

Pour les capteurs-transmetteurs, on peut utiliser un dispositif de laminage du fluide réglable en fonction des pulsations du réseau. Celui-ci peut être complété par un limiteur de surpression qui bloque automatiquement un clapet d'isolement. La vitesse de réaction du clapet est réglable.

13.2.5 Corrosion

Le matériau constituant l'élément sensible doit être compatible avec la nature du fluide. On utilise généralement un système intermédiaire de transmission de pression constitué d'un séparateur à membrane résistant à la corrosion (acier inox, le nickel, des alliages fer-nickel…) ou recouvert d'un matériau de protection type téflon, et d'un liquide de remplissage.

La présence d'un séparateur à membrane modifie le temps de réponse en fonction de sa propriété à suivre les variations de pression dans la conduite, et peut créer aussi une erreur de mesurage en fonction de sa qualité.

De même, le liquide de remplissage doit être insensible aux variations de température en ayant un coefficient de dilatation thermique le plus faible possible. On utilise généralement une huile silicone adaptée au régime de température (de l'ordre de 8.10^{-4} $cm^3.cm^{-3}.°C^{-1}$).

14 • ANNEXES

14.1 Détail de fonctionnement d'un pont de Wheatstone

Le pont de Wheatstone, du nom de son inventeur (Charles WHEATSTONE, ingénieur anglais, né en 1802, décédé en 1875) permet de mesurer à l'aide d'un galvanomètre une résistance inconnue à partir de 4 résistances connues.

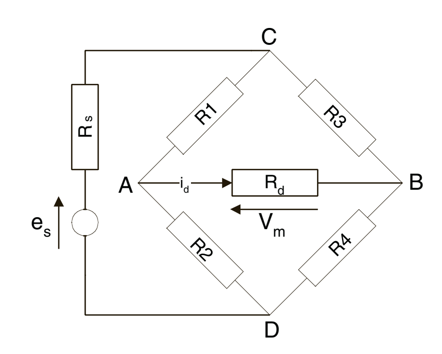


Figure 14.1 – Schéma d'un pont de Wheatstone

Si on considère:

- e_s = la force électromotrice de la source (par exemple un capteur quelconque).
- R_s = la résistance de la source.
- R_d = la résistance de l'appareil de mesure.
- V_m = la tension mesurée par l'appareil de mesure.
- i_d = le courant .

Les équations de Kirchhoff permettent de calculer le courant i_d :

$$i_d = e_S \frac{R_2R_3 - R_1R_4}{R_1R_4(R_2+R_3) + R_2R_3(R_1+R_4) + R_S(R_1+R_3)(R_2+R_4) \dots + R_d(R_1+R_2)(R_3+R_4) + R_S R_d(R_1+R_2+R_3+R_4)}$$

Le pont est équilibré lorsque $V_A = V_B$. La tension i_d est alors nulle : $R_1.R_4 = R_2.R_3$. La condition d'équilibre du pont de Wheatstone ne dépend que de ses résistances propres, et est indépendante des résistances de la source R_s et de l'appareil de mesure R_d.

14.2 Équivalence des unités de pression

Tableau 14.1 – Équivalence des unités de pression

	Pa	kPa	MPa	bar	mbar	mm CE	mm Hg	atm	psi
Pa	1	1,00E-3	1,00E-6	1,00E-5	1,00E-2	1,02E-1	7,50E-3	9,869E-6	1,450E-4
kPa	1,00E+3	1	1,00E-3	1,00E-2	10	102	7,5006	9,869E-3	0,1450
MPa	1,00E+6	1,00E+3	1	10	1,00E+4	1,02E+5	750E+3	9,869	145E+2
bar	1,00E+5	1,00E+2	1,00E-1	1	1,00E+3	1,02E+4	750E+2	0,9869	14,5
mbar	1,00E+2	0,1	1,00E-4	1,00E-3	1	10,197	750E-2	9,87E+4	145E-2
mm CE	9,806	9,806E-3	9-086E-6	9,806E-5	9,806E-5-2	1	7,355E-2	9,680E-5	1,422E-3
mm Hg	1,333E+2	1,333E-1	1,330E-4	1,330E-3	1,333	13,595	1	1,315E-3	0,019337
atm	1,013E+5	1,013E+2	1,013E-1	1,0132	1,013E+3	1,013E+4	760	1	14,696
psi	6,894E+3	6,894	6,894E-3	6,894E-2	68,94	703,8	51,715	0,068	1

F

Les mesures de combustion

15 • LES MOYENS DE MESURAGE

Les calculs de combustion, et leur interprétation, nécessitent de disposer d'un ensemble de données théoriques et de données expérimentales recueillies sur le site lors de mesurages simultanés.
Les données théoriques comprennent principalement les caractéristiques du combustible (nature, propriétés et composés chimiques).
Les données expérimentales comprennent les paramètres physico-chimiques mesurés (températures au foyer, température des produits de combustion, température ambiante, teneur en O_2, en CO, en NO, en NO_2, en SO_2…) et les paramètres calculés (excès d'air, CO_2, NO_x…).
La plupart des fabricants d'analyseur de combustion mettent à disposition des matériels de mesure portatif permettant de faire toutes les quantifications nécessaires, y compris avec une sortie imprimante pour laisser un relevé détaillé dans le cahier de chaufferie.



Figure 15.1 – Analyseur de combustion (doc. KIMO)

Les paramètres déterminés sont les suivants :

- $\%O_2$: le pourcentage d'oxygène permet de connaître la quantité d'oxygène fournie en excès par l'air de combustion ;
- CO : monoxyde de carbone mesuré en ppm, permet de déterminer la qualité de la combustion (réductrice si $\lambda < 1$, ou oxydante si $\lambda > 1$) ;

– $\%CO_2$: le pourcentage de dioxyde de carbone dilué dans le volume de fumées sèches :
  • valeurs maximales théoriques = 11,9 % CO_2 pour le gaz naturel et 15,4 % CO_2 pour le fioul domestique ;
  • valeur pratiques = de 9 à 10 % CO_2 pour le gaz naturel et de 12 à 13 % CO_2 pour le fioul domestique.
– NO : monoxyde d'azote.
– NO_2 : dioxyde d'azote.
– NO_x : oxyde d'azote.
– SO_2 : dioxyde de soufre.
– λ : excès d'air, appelé aussi facteur d'air.
– η : rendement de combustion.
– T_f : température des fumées.
– T_{amb} : température ambiante.

15.1 Les analyseurs chimiques

Le fonctionnement de ces appareils repose sur l'absorption chimique des différents constituants gazeux.

15.1.1 Principe de fonctionnement des analyseurs à variation de volume

Le constituant chimique dont on veut connaître la concentration est fixé par une réaction chimique.
Le modèle très utilisé par les thermiciens a été l'analyseur « Fyrite » qui se présente sous forme d'un récipient en forme de doubles sphères en plastic transparent contenant un liquide noirâtre. Il suffit de faire circuler dans le liquide une certaine quantité de gaz de combustion prélevé dans le conduit de fumée par une poire en caoutchouc et de mélanger l'ensemble en retournant un certain nombre de fois l'analyseur.
En opérant à pression constante, la contraction de volume de l'échantillon prélevé donne directement la concentration du gaz considéré. Le résultat est exprimé en pourcentage de fumée sèche.
Avec l'avènement de l'électrochimie, les constructeurs ont mis à disposition des techniciens des équipements nécessitant très peu de manipulation. Il suffit d'introduire une canule dans le conduit de fumée et l'appareil détermine tous les paramètres souhaités, soit par mesure, soit par calcul.
L'analyseur de combustion se compose principalement d'une pompe d'aspiration, munie d'un filtre à particules et d'un pot à condensats, qui fait transiter le gaz dans différentes cellules électrochimiques, généralement pour mesurer le CO, O_2, NO et NO_2.
Les cellules de mesure sont composées de deux électrodes ainsi que d'une solution électrolytique. Le processus d'oxydation génère une tension entre l'anode et la cathode proportionnellement à la concentration du gaz. Le signal est traité analogiquement, puis numériquement par un microprocesseur afin d'être affiché et/ou imprimé.

Suivant le gaz mesuré, les réactifs utilisés sont :

– pour le gaz carbonique : la soude ou la potasse (formation de carbonate)
– pour l'oxygène : le pyrogallate de potasse, le pyrogallate de soude et le chlorure chromeux
– pour l'oxyde de carbone : les solutions ammoniacales et les solutions chlorhydriques de chlorure cuivreux

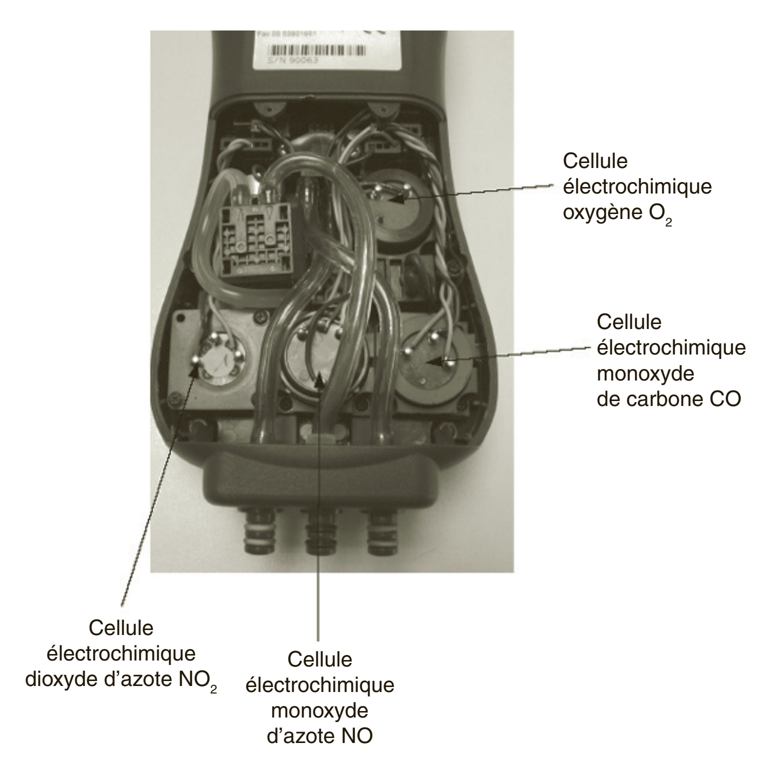


Figure 15.2 – Analyseur de combustion à cellules électrochimiques (doc. KIMO)

Exemple de la cellule à oxygène (Figure 15.3)

Les molécules d'oxygène traversent la membrane et se trouvent en contact avec l'anode. La réaction chimique entraîne la formation d'ions OH^- :

$$O_2 + 2\ H_2O + 4\ e^- \rightarrow 4\ OH^-$$

Les ions migrent dans l'électrolyte liquide vers l'anode en générant un courant électrique proportionnel à la concentration en oxygène :

$$2\ Pb + 4\ OH^- \rightarrow 2\ PbO + 2\ H_2O + 4\ e^-$$

La tension est mesurée sur la résistance du pont électrique externe. Le capteur de température CTN (coefficient de température négatif ; voir chapitre « Les mesures de température ») permet de compenser les variations de températures.

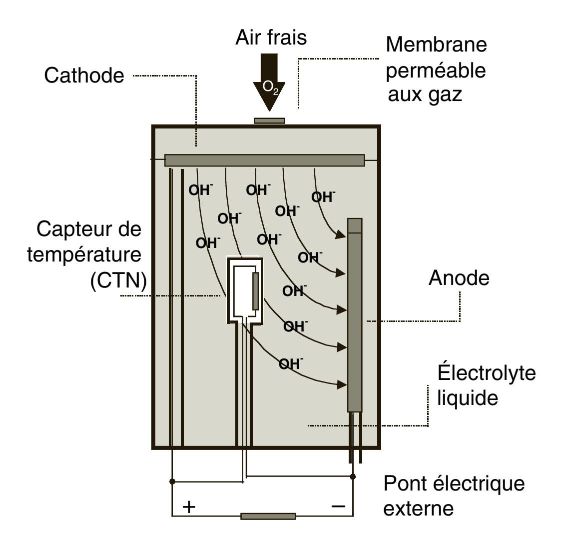


Figure 15.3 – Fonctionnement de la cellule d'oxygène O_2 (doc. TESTO)

15.1.2 Principe de fonctionnement des analyseurs à changement de coloration de réactif

Un réactif est contenu dans une ampoule de verre. On fait passer un volume de fumée refroidie à 80 °C maximum dans le réactif et on observe son changement de couleur. En fonction de la longueur de l'ampoule affectée par le changement de couleur, on détermine la teneur en composé (CO, CO_2).

15.2 Les analyseurs à principe physique

Le principe de fonctionnement de ces analyseurs repose sur la mesure d'une qualité propre à chacun des constituants gazeux.

15.2.1 Principe de fonctionnement des analyseurs à absorption dans l'infrarouge

Les gaz présentent des bandes d'absorption différentes dans le domaine de l'infrarouge. Par exemple, le gaz carbonique présente des bandes d'absorption spécifiques tandis que l'azote et l'oxygène restent transparents.
On peut déterminer la concentration en CO_2, CO et SO_2 en fonction de l'absorption des produits de combustion (avec par exemple le matériel HORIBA type PG 250).

15.2.2 Principe de fonctionnement des catharomètres à fils chaud

On a vu dans le chapitre relatif à la mesure de la vitesse à l'aide d'un fil chaud, que le coefficient de convection d'un fluide est aussi fonction de sa conductivité thermique. Par exemple, la conductivité du gaz carbonique est de 0,0125 $kcal.m^{-1}.h^{-1}.°C^{-1}$ et celle de l'oxygène est de 0,02 $kcal.m^{-1}.h^{-1}.°C^{-1}$.
Cette propriété est exploitée par le cataromètre. En fonction du refroidissement des fils, on peut en déduire la nature du gaz en comparant leur résistance électrique.

15.2.3 Principes de fonctionnement des détecteurs paramagnétiques

Ce type de matériel est principalement utilisé pour la quantification de l'oxygène.

La molécule d'O_2 est fortement attirée par un champ magnétique puissant. Ce principe permet de mesurer des concentrations rapidement avec une bonne précision.

15.3 Les opacimètres

L'opacité des fumées dépend de la concentration en particules en suspension, notamment en carbone imbrûlé, et en imbrûlés solides pour le charbon. C'est ce que l'on appelle le « smoke-test » ou indice de « Bacharah ». Il permet de contrôler la propreté de la combustion.
Il existe un procédé manuel et un procédé électronique pour déterminer cet indice de noircissement des fumées, notamment celles de fioul et de charbon.

15.3.1 Le « smoke-test » manuel

C'est certainement encore le moyen le plus utilisé pour déterminer l'opacité des fumées de fioul.
Ce smoke-test est constitué d'une pompe à main dans laquelle on insère une bande de papier blanc calibré, et qui permet de déterminer l'indice d'opacité selon l'échelle de Bacharach.



Figure 15.4 – Pompe manuelle de « smoke-test » et indice de Bacharah (doc. TESTO)

En aspirant 10 fois avec la pompe dont l'extrémité est dans le conduit de fumée, on fait passer certain volume de produit de combustion (représentant le volume de 1,63 litre à 0 °C sous 1 013 mbar) au travers du papier filtre. Les particules en suspension sont retenues sur le papier et forment un cercle plus ou moins noir suivant le combustible et la qualité de la combustion.
Après une à trois séances de pompage pour obtenir une valeur moyenne, on détermine la qualité de la combustion en fonction de la graduation de 0 (blanc) à 9 (noir) du papier :

– < 1 pour gaz naturel.
– < 2 pour le fioul domestique.
– < 6 pour le fioul lourd.

Il est recommandé de vérifier la qualité de la combustion avec un smoke-test avant d'utiliser un analyseur de combustion afin de ne pas encrasser inutilement les cellules de celui-ci.

15.3.2 Le « smoke-test » électronique

La présence sur le marché d'opacimètre électronique permet une détermination plus aisée de l'indice de Bacharah.

Le prélèvement de produit de combustion se fait automatiquement pendant 1 minute, et le calcul de la valeur moyenne est fait par l'opacimètre.





Figure 15.5 – Pompe électronique de « smoke-test » et indice de Bacharah (doc. TESTO)

Voir figure 15.6 ci-après.

15.3.3 La détermination de la teneur en carbone

Un graphique permet de déterminer la concentration de carbone par kilogramme de fioul en fonction de l'excès d'air de la combustion :

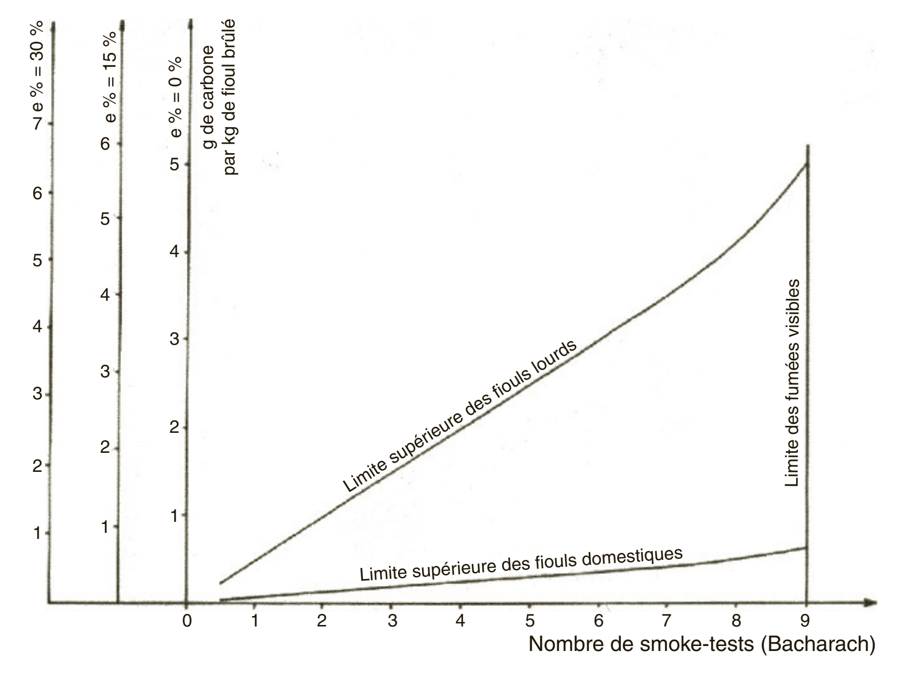


Figure 15.7 – Détermination de la teneur en carbone

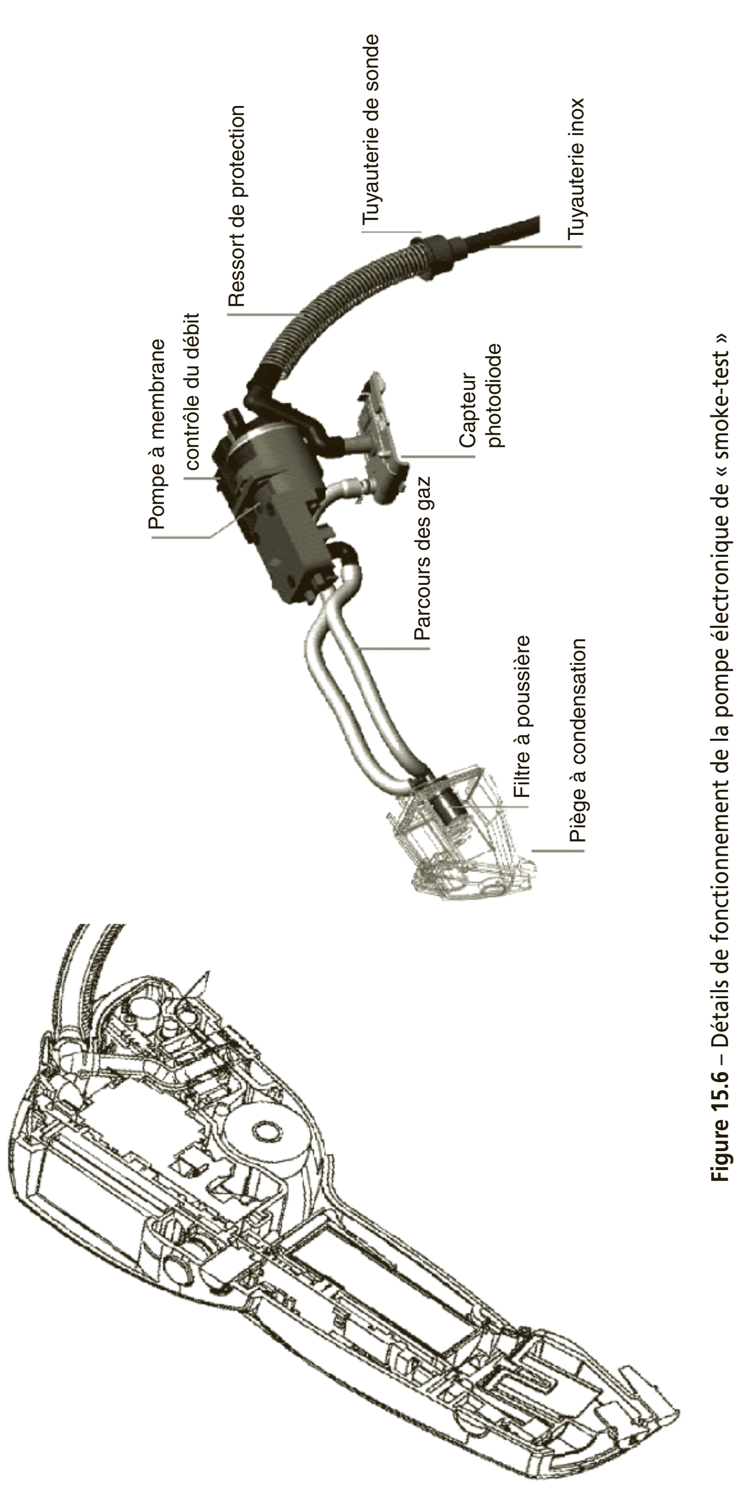


Figure 15.6 – Détails de fonctionnement de la pompe électronique de « smoke-test » (doc. TESTO)

15.4 Les thermomètres de fumée

■ Le thermomètre à résistance électrique

Ce type de thermomètre est utilisé pour mesurer la température de l'air de combustion en entrée de chaudière, à l'aspiration du brûleur.
Se reporter à la Partie « Mesure de Température », Chapitre 6.5 « Capteur à résistance Pt100 ».

■ Le thermocouple

Ce type de thermomètre est utilisé pour mesurer la température des fumées en sortie de chaudière.
Se reporter à la Partie « Mesure de température », Chapitre 6.7 « Thermocouple ».

15.5 Les dépressostats de conduit

La dépression dans le conduit de fumée est un paramètre de fonctionnement et de sécurité très important. Elle indique si le tirage thermique, généré par la dilatation des gaz chauds, est suffisant pour le fonctionnement de la chaudière et aussi suffisant pour évacuer les produits de combustion vers l'extérieur de la chaufferie.
De construction, la pression doit être inférieure ou égale à zéro à la buse de la chaudière de manière à être certain que le conduit de fumée ne sera pas en pression dans la suite de son parcours.
Un tirage d'air excessif n'est pas non plus souhaitable car il perturberait le bon fonctionnement des échangeurs de chaleur et nuirait au rendement de l'installation. C'est pour cela que la mesure de la dépression reste une donnée énergétique fondamentale.
Dans le présent document, il est question principalement des conduits de fumées raccordées à des chaudières à tirage naturel. Les extractions mécaniques de fumées et les chaudières à « ventouse » ne seront pas abordées, mais le principe des analyses de combustion reste le même.

16 • LES MÉTHODES DE MESURAGE

16.1 Les points de prélèvements

16.1.1 Les paramètres physico-chimiques

Les mesurages des paramètres physico-chimiques (température des produits de combustion, smoke-test, teneur en O_2, en CO, en NO, en NO_2, en SO_2…) doivent être effectués au même endroit. Simultanément, ou presque, il faut aussi mesurer la température ambiante et si possible la température du foyer.

Quelques précautions élémentaires sont à respecter pour minimiser l'influence des paramètres extérieurs, comme une veine de fumée non homogène, l'inétanchéité de la chaudière ou la présence d'un coupe-tirage.

La canule de prélèvement doit être placée dans l'axe de la veine de fumée et l'étanchéité doit être maintenue en périphérie de l'orifice à l'aide du cône afin d'éviter les entrées d'air parasite.

Un point de prélèvement situé à l'équivalent minimum de 2 fois le diamètre nominal du conduit après la buse de la chaudière peut suffire.

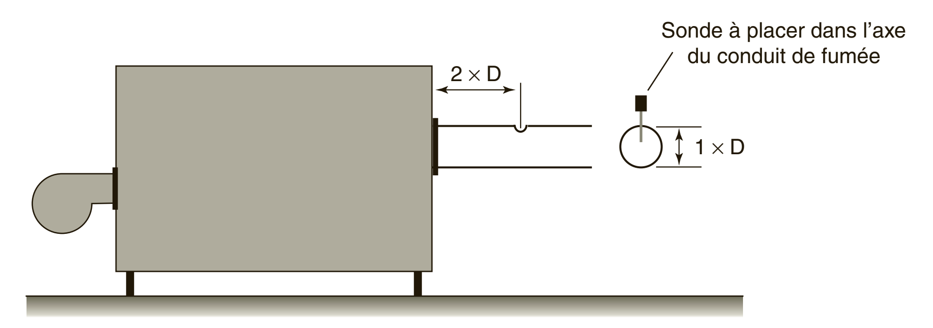


Figure 16.1 – Point de prélèvement sur raccordement de chaudière

F

LES MESURES DE COMBUSTION

En cas de présence d'un coude, il faut respecter au minimum 1 fois le diamètre après le coude.

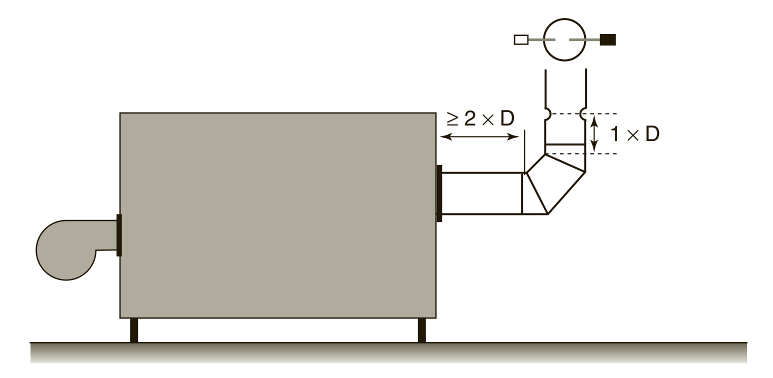


Figure 16.2 – Point de prélèvement après un coude

La règle des « 2D » s'applique aussi pour les chaudières atmosphériques avec ou sans coupe-tirage.

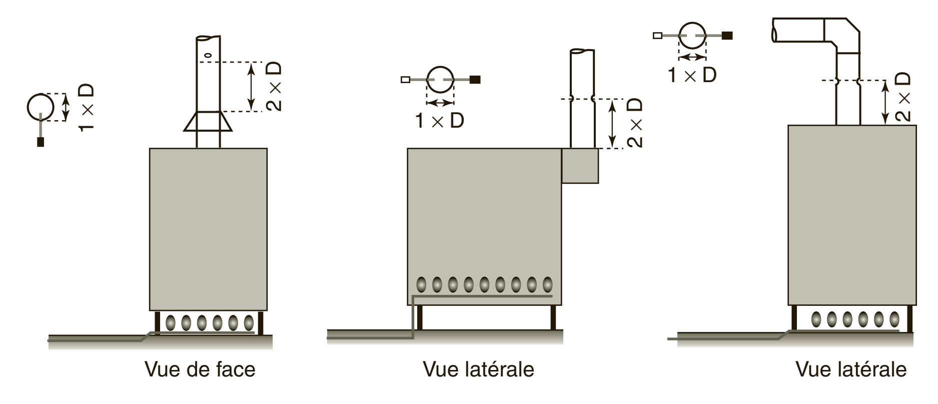


Figure 16.3 – Point de prélèvement sur raccordement de chaudière à brûleur atmosphérique

16.1.2 La dépression

Pour la dépression dans le conduit, le point de mesure est le même que pour les paramètres physico-chmiques.

16.1.3 La température de l'air comburant

Pour la température de l'air comburant, il y a lieu de procéder à un mesurage le plus près possible de l'aspiration du brûleur afin que la température soit vraiment celle qui est utilisée pour la combustion.

16.1.4 Le taux de CO ambiant

Pour des raisons de sécurité, il est recommandé de procéder à des mesurages du taux de monoxyde de carbone CO dans l'air ambiant du local où se trouve le, ou les, appareil(s) à combustion.

La procédure décrite dans la norme NF X 50-010 (combustible gazeux) et NF X 50-011 (combustible fioul domestique) précise que l'organe de mesure doit être déplacé sur la largeur de la chaudière à environ 0,50 m de sa face avant et pendant 30 secondes minimum.
En fonction du résultat du mesurage, on considère :

– si la teneur en CO < 25 ppm, la situation est normale ;
– si 25 ppm ≤ teneur en CO < 50 ppm, il y a anomalie de fonctionnement nécessitant impérativement des investigations complémentaires concernant le tirage du conduit de fumée et la ventilation du local ;
– Si la teneur ≥ 50 ppm, il y a injonction faite à l'usager de maintenir sa chaudière à l'arrêt jusqu'à la remise en service de l'installation dans les conditions normales de fonctionnement.

16.2 L'utilisation des cellules électrochimiques

La durée de vie des cellules électrochimiques varie évidemment en fonction de leur fréquence d'utilisation, sauf pour la cellule d'O_2 qui « s'use même si l'on ne s'en sert pas ».
En effet, cette cellule étant en permanence en présence d'air (rappel : l'air contient environ 21 % d'oxygène), il se produit une réaction chimique continue. Pour pallier ce problème, il est recommandé de sortir la cellule d'O_2 de l'appareil de manière à désaccoupler son raccordement pour empêcher la réaction chimique.
Une cellule d'O_2 peut fonctionner pendant environ 3 ans tandis que les cellules de CO, NO, NO_2 et SO_2 ont une durée de 2 ans seulement dans les conditions d'utilisation « normales » correspondant à leur valeur de fonctionnement nominal. Si un capteur est souvent soumis à des valeurs limites, sa durée de vie en sera raccourcie.
L'entretien du filtre à particules et l'entretien du pot à condensats interfèrent aussi beaucoup sur la durée de vie du matériel. La présence d'eau en permanence endommagerait les capteurs.
Le pot à condensats doit toujours être maintenu verticalement et vidé avant d'être plein..
Certains équipements assurent eux-mêmes la purge des gaz présents avec de l'air ambiant après chaque mesurage afin d'augmenter la durée de vie des cellules.

17 • ANNEXES

17.1 Rappels élémentaires de combustion

17.1.1 La combustion neutre, dite stœchiométrique

La combustion neutre, dite « stœchiométrique » du grec « stoikheion » qui signifie l' « élément », représente la combustion idéale. Elle correspond à la combustion parfaite, sans excès d'air et sans imbrûlés résiduels.
Si la combustion est complète, chaque élément de carbone, d'hydrogène et de soufre (cas du fioul) réagissent avec l'oxygène contenu dans l'air pour former respectivement du dioxyde carbone CO_2, de la vapeur d'eau H_2O et du dioxyde de soufre SO_2.
S'il n'y a pas assez d'oxygène, si le mélange air comburant est insuffisant ou si les gaz brûlés sont trop froids par exemple pour atteindre la température de combustion, la combustion sera incomplète. Dans ce cas la combustion est réductrice et les produits de combustion contiendront encore des composés combustibles comme le monoxyde de carbone CO, des suies sous forme de carbone C et aussi des hydrocarbones C_XH_Y.
Pour obtenir une combustion stœchiométrique, il faudrait en théorie :

– pour le gaz : 9,9 Nm^3 d'air/m^3 gaz ;
– pour le fioul : 11,42 Nm^3 d'air/ kg fioul (la densité du fioul est environ de 840 kg/m^3 à 15 °C).

En pratique, pour assurer une combustion complète du combustible, on majore la quantité d'air nécessaire d'environ 20 % pour le gaz et de 20 à 30 % pour le fioul.
En France, nous disposons de deux types de gaz naturel :

– le gaz type « B » ou « L » provenant de Groningue (Pays-Bas) et distribué principalement dans le Nord de la France, avec un PCS (Pouvoir Calorifique Supérieur) compris entre 9,5 et 10,5 kWh/Nm^3 ;
– le gaz type « H » distribué sur le reste du territoire, avec un PCS (Pouvoir Calorifique Supérieur) compris entre 10,7 et 12,8 kWh/Nm^3.

Le PCS (Pouvoir Calorifique Supérieur) correspond à l'énergie produite par la combustion complète d'un kilogramme de carburant, ou 1 Nm^3 de gaz, en tenant compte de la chaleur latente comprise dans la vapeur d'eau.
Le PCI (Pouvoir Calorifique Inférieur) correspond à l'énergie produite par la combustion complète d'un kilogramme de carburant, ou 1 Nm^3 de gaz, sans tenir compte de la chaleur latente comprise dans la vapeur d'eau.

On admet couramment que le P.C.I. = 90 % du PCS.

La chaleur latente de vaporisation de l'eau correspond à 2 511 kJ/kg. C'est cette énergie qui est en partie récupérée dans les chaudières à condensation.

Tableau 17.1 – Caractéristiques de la combustion stœchiométrique selon le combustible utilisé (d'après doc. Ph. Legourd)

Composition	Fioul domestique	Gaz naturel type H	Gaz naturel type B	Propane C_3H_8	Butane C_4H_{10}	UNITÉS
Fumées humides (à 0 °C)	11,9 m^3 (n)/kg	10,82	9,37	26,16	34,66	m^3 (n)/m^3 (n)
Fumées sèches (à 0 °C)	10,5 m^3 (n)/kg	8,9	7,72	22,81	29,74	m^3 (n)/m^3 (n)
Teneur en H_2O	1,4 m^3 (n)/kg	1,64	1,41	3,3	4,2	kg/m^3
Teneur en CO_2	15,4 %	11,9	11,65	13,7	14	%
Teneur en CO_2	1,83 m^3 (n)/kg	1,06	1,1	3,58	14	m^3 (n)/m^3 (n)
Teneur en CO_2	3,62 kg/kg	2	2,16	7,085	9,6	kg/m^3 (n)
Masse volumique (à 15 °C)	840 kg/m^3	0,784	0,83	2,011	2,708	kg/m^3
Densité	0,84	0,6	0,64	1,55	2,09	
PCI	10 kW.h/litre	10,4	9,1	25,4	32,9	kW.h/m^3 (n)
PCI	12 kW.h/kg			12,8	12,7	kW.h/kg
PCS		11,5	10,1	27,5	35,6	kW.h/m^3 (n)
PCS	12,7 kW.h/kg			13,9	13,7	kW.h/kg
Volume d'air nécessaire	11,42 m^3 (n)/kg	9,9	8,45	24,37	32,37	m^3 (n)/m^3 (n)

17.1.2 Calcul du rendement de combustion

Le re,ndement instantané de combustion tenant compte des pertes par les fumées se calcule par l'équation empirique de Siegert :

$$\eta = 100 - \left[(T_{gas} - T_{amb}).\left(\frac{A_1}{CO_2} + B\right)\right] = 100 - \left[(T_{gas} - T_{amb})\left(\frac{A_2}{21 - O_2} + B\right)\right]$$

$$\text{et } CO_2 = CO_{2max}\frac{21 - O_2}{21}$$

On retrouve alors : $A_2 = \dfrac{21.A_1}{CO_{2max}}$

Les paramètres A_1, A_2, B et CO_2 max sont mémorisés dans l'analyseur de combustion sous ces valeurs (exemple matériels « Made in Germany ») :

F

LES MESURES DE COMBUSTION

	A_1	A_2	B	CO_2 max
gaz naturel	0,37	0,65	0,009	12 %
butane	0,475	0,71	0	14,1 %
propane	0,475	0,73	0	13,7 %
fioul domestique	0,5	0,68	0,007	15,4 %
fioul lourd	0,61	0,81	0	15,9 %
charbon	0,68	0,76	0	18,8 %
bois	0,65	0,7	0	19,4 %

Il convient toutefois de noter que ces valeurs peuvent varier d'un constructeur à un autre en considérant les interprétations possibles concernant la nature exacte du combustible.

Par exemple, les paramètres relatifs au gaz naturel sont différents pour un type « B » et pour un type « H », la qualité du charbon considérée est différente selon sa provenance, la forme du bois introduit dans le foyer a son importance (pellets ou briquettes par exemple), etc.

Chaque constructeur retient ses propres hypothèses selon sa norme nationale et c'est pour cela qu'il faut connaître les constantes de calculs entrées en mémoire pour pouvoir comparer les résultats de deux analyseurs de combustion.

Par ailleurs, on peut aussi remarquer que la formule de SIEGERT ne tient compte que des pertes par les fumées mais pas de celles par les parois de la chaudière ni s'il s'agit d'une combustion incomplète car cela est impossible à quantifier. Ces simplifications permettent toutefois le réglage du brûleur avec un minimum de précision.

17.1.3 Calcul de l'excès d'air

L'excès d'air λ se calcule en fonction du volume des fumées sèches et du pourcentage d'oxygène mesuré dans les produits de combustion :

$$\lambda = 100 \frac{O_2\text{mesuré}}{20{,}9 - O_2\text{mesuré}} \frac{Vf_o}{V_a}$$

avec :

λ = excès d'air, en %.

Vf_o = volume des fumées sèche théorique (voir la valeur dans le tableau ci-avant suivant le combustible), en Nm^3 de fumée /Nm^3 de gaz (ou /kg de fioul).

V_a = volume d'air théorique (voir la valeur dans le tableau ci-avant suivant le combustible), en Nm^3 d'air /Nm^3 de gaz (ou /kg de fioul).

Le calcule est similaire si l'on dispose du pourcentage de dioxyde de carbone :

$$\lambda = 100 \frac{CO_2\text{théorique} - CO_2\text{mesuré}}{20{,}9 - O_2\text{mesuré}} \frac{Vf_o}{V_a}$$

avec :

CO_2théorique = voir la valeur dans le tableau ci-avant suivant le combustible.

17.1.2 Calcul du taux de dioxyde d'azote NO_x

Le calcul du taux de NOx peut se faire de deux méthodes :

- $NO_x = NO + NO_2$; NO_x, NO et NO_2 étant exprimés en ppm.
- $NO_x = NO/0{,}97$; NO_x et NO étant exprimés en ppm (il est à noter que la valeur 0,97 est utilisée en France et en Italie, alors qu'elle de 0,95 en Allemagne, par exemple).

17.2 Ordres de grandeur d'un bon réglage de combustion

Tableau 17.2 – Ordres de grandeurs des principaux paramètres de combustion (d'après doc. Ph. Legourd)

Gaz H ou L		Fioul domestique	
CO	< 20 ppm	Smoke (opacité)	< 1
CO_2	9 à 10 %	CO_2	12 à 13 %
O_2	3,4 à 4,54 %	O_2	3,5 à 4,7 %
Facteur d'air (λ)	≈ 1,18 à 1,25	Facteur d'air (λ)	≈ 1,20 à 1,30
t° maxi fumées	doc. chaudière	t° maxi fumées	doc. chaudière
t° mini fumées	doc. chaudière ou > 110 °C	t° mini fumées	doc. chaudière ou > 150 °C
Tirage (mmCE)	entre – 0,5 et – 2	Tirage (mmCE)	entre – 0,5 et – 2
Tirage (hPa) ou (mbar)	entre – 0,05 et – 0,2	Tirage (hPa) ou (mbar)	entre – 0,05 et – 0,2
Pression foyer	doc. chaudière	Pression foyer	doc. chaudière
Pertes par les fumées (qA)	$0{,}47 \times \frac{tf - tair}{CO_2}$	Pertes par les fumées (qA)	$0{,}59 \times \frac{tf - tair}{CO_2}$

17.3 Les unités

■ Les ppm

Les « ppm » (parts par million) :

- 10 000 ppm = 1 %
- 1 000 ppm = 0,1 %
- 100 ppm = 0,01 %
- 10 ppm = 0,001 %
- 1 ppm = 0,0001 %

F

LES MESURES DE COMBUSTION

Le mg/l et le mg/m³

– 1 mg/l = 1 g/m³
– 1 µg/l = 1 mg/m³

Conversion ppm en mg/Nm³ de fumée sèche

$$\text{ppm} = \frac{\text{masse molaire}}{\text{volume normé d'une mole}}$$

Exemple :

28 ppm de CO sont équivalents à $\frac{28 \text{ mg}}{22{,}4 \text{ Nm}^3}$ = 1,25 mg/Nm³ de fumée sèche.

Conversion ppm en mg/kWh PCI

$$\text{mg/kWhPCI} = \text{mg/Nm}^3 \text{ de fumées sèches}.\frac{\text{volume de fumée sèche}}{\text{PCI}}$$

Suite de l'exemple précédent dans le cas de la combustion stœchiométrique du gaz naturel (voir autres combustibles dans le tableau précédent) :

1,25 mg/Nm³ de CO est équivalent à $\frac{1{,}25.8{,}9}{10{,}4} = 1{,}07$ mg/kWh PCI

Conversion des principaux polluants :

	ppm	mg/Nm³ à 0 % O_2	mg/kWh PCI
CO	1	1,25	1,07
NO	1	1,34	1,15
NO_x	1	2,05	1,76
SO_2	1	2,86	2,45

17.4 Les teneurs en O_2

Les valeurs des différents polluants sont ramenées à des valeurs réglementaires de teneur en oxygène afin de faciliter les comparaisons. La réglementation précise :

– 3 % pour le fioul et le gaz.
– 6 % pour le charbon.

Pour le fioul ou le gaz :

$$\text{teneur corrigée} = \text{teneur mesurée}.\frac{21\%-3\%}{21\% - x\%}$$

Pour le charbon :

$$\text{teneur corrigée} = \text{teneur mesurée}.\frac{21\%-6\%}{21\% - x\%}$$

La teneur mesurée peut être exprimée en ppm ou en mg/m³, et la teneur x% en oxygène s'exprime par rapport aux fumées sèches.

G

Les mesures acoustiques et vibratoires

18 • LES MOYENS DE MESURAGE

Ce chapitre fait référence à des textes réglementaires ou normatifs en vigueur au moment de la rédaction du présent ouvrage. Ces textes sont susceptibles d'être modifiés, révisés ou abrogés. Le lecteur devra s'assurer que les textes cités sont encore en vigueur pour leur utilisation au plan réglementaire.
Les mesures acoustiques ou vibratoires peuvent être réalisées de différentes manières et avec différents matériels selon le paramètre que l'on veut mettre en évidence.
On choisira l'appareil suivant selon les mesures envisagées :

- un sonomètre pour des mesures acoustiques dans l'environnement ou dans les locaux ;
- un sonomètre pour des mesures de puissance acoustique de source ;
- un exposimètre ou un sonomètre pour des mesures d'exposition sonore des travailleurs ;
- un accéléromètre pour la mesure de la gêne vibratoire ou pour la vérification des contraintes vibratoires sur le bâtiment.

L'accéléromètre est toujours associé à un analyseur pour analyser le signal alors que le sonomètre et l'exposimètre permettent d'effectuer les mesures directement.
Le lecteur pourra trouver au chapitre 21 les notions d'acoustique indispensables à la compréhension des termes utilisés.
La méthodologie liée à chaque type de mesure figure aux chapitres 19 et 20.
Le début de ce chapitre abordera le principe de fonctionnement des appareils mis à la disposition des techniciens pour procéder aux mesures, ensuite le lecteur verra les différentes mesures qu'il peut réaliser, les précautions à prendre pour réaliser ces mesures et les erreurs à ne pas commettre.

18.1 Le sonomètre

Ce que l'on appelle couramment un sonomètre est en réalité une chaîne de mesure qui comprend un capteur : le microphone, un préamplificateur, un analyseur et un calibreur.
Le sonomètre conventionnel permet la mesure du niveau de pression acoustique global pondéré ou non pondéré avec éventuellement la fonction d'intégration pour mesurer le niveau de pression acoustique continu équivalent. Les sonomètres les plus élaborés permettent la mesure du niveau de pression acoustique par bandes de fréquences et le stockage de ces valeurs dans une mémoire interne.

Les réglementations concernant les mesures dans l'environnement, les mesures de puissance acoustique ou les mesures d'exposition sonore quotidienne imposent des sonomètres intégrateurs pour réaliser les mesurages.



Figure 18.1 – Sonomètre Blue Solo (Source 01dB-Metravib)

18.1.1 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement du sonomètre est basé sur la mesure de la pression acoustique appliquée au microphone. Le principe de construction et de contrôle des sonomètres est défini dans l'arrêté du 27 octobre 1989 modifié par l'arrêté du 30 mai 2008 qui renvoie aux normes NF EN 61672-1 de juin 2003, NF EN 61672-2 de septembre 2003 et NF EN 61672-3 de mars 2007. La norme NF EN 61672-1 de juin 2003 remplace les normes NF EN 60651 de juillet 1994 (NF S 31-009 sonomètres) et NF EN 60804 d'avril 2001 (NF S 31-109 sonomètres intégrateurs moyenneurs).

Ce matériel de mesurage possède deux classes de précision, la classe 1 et la classe 2 définies dans la norme NF EN 61672-1 de juin 2003 (voir le chapitre 19 pour la définition des classes de précision des sonomètres). Les limites de tolérance de la classe 2 sont supérieures aux limites de tolérance de la classe 1.

Selon les normes de mesure prises en considération, la classe 2 suffit mais dans certains cas, la classe 1 est imposée pour réaliser les mesurages. Par exemple, pour mettre en évidence des tonalités marquées ou des bruits impulsionnels lors d'une mesure dans l'environnement.

Le lecteur se rapprochera des différentes normes en vigueur pour connaître les contraintes d'utilisation du matériel et les exigences particulières de chaque mesure.

■ Le microphone

Le capteur (microphone) est un transducteur qui transforme proportionnellement la pression acoustique en tension électrique. Les caractéristiques principales du microphone sont sa sensibilité et sa directivité.

La sensibilité d'un microphone est donnée, pour une fréquence particulière, en volt par pascal de pression acoustique. Les microphones de qualité utilisés sur les

sonomètres sont généralement des microphones à électret qui possèdent une sensibilité indépendante de la fréquence dans un domaine de fréquence assez large, correspondant en général à la gamme des fréquences audibles (20 Hz – 20 000 Hz).

Pour la mesure d'un niveau de pression acoustique en décibel pondéré A, le microphone doit avoir une sensibilité indépendante de la fréquence pour le domaine de fréquence considéré.

La directivité d'un microphone est caractérisée par la variation de sensibilité de ce capteur selon la direction d'arrivée de l'onde acoustique. Elle dépend de la taille et de la forme du microphone. Les microphones couramment utilisés sur les sonomètres sont de la taille d'un demi-pouce. La taille du microphone dépend de sa plage de sensibilité en fréquence. Plus le microphone est gros, plus sa sensibilité est importante en basse fréquence et plus il sera directif.

Il faut donc choisir un microphone adapté à la mesure à réaliser. Pour une mesure dans l'environnement, si la source n'est pas identifiée, il faudra choisir un microphone non directif qui prend en compte les ondes acoustiques provenant de toutes les directions.

Tous les microphones de qualité sont accompagnés de leur courbe de sensibilité en fonction de la fréquence. Avec l'âge, la température ou l'hygrométrie, la sensibilité du microphone peut varier. Il faut donc vérifier périodiquement ce paramètre au moyen d'un contrôleur multi niveaux multi fréquences. Cette procédure d'autovérification est imposée dans la norme NF S 31-010 de décembre 1996, au moins tous les six mois, dans le cadre de la mesure dite « d'expertise ».

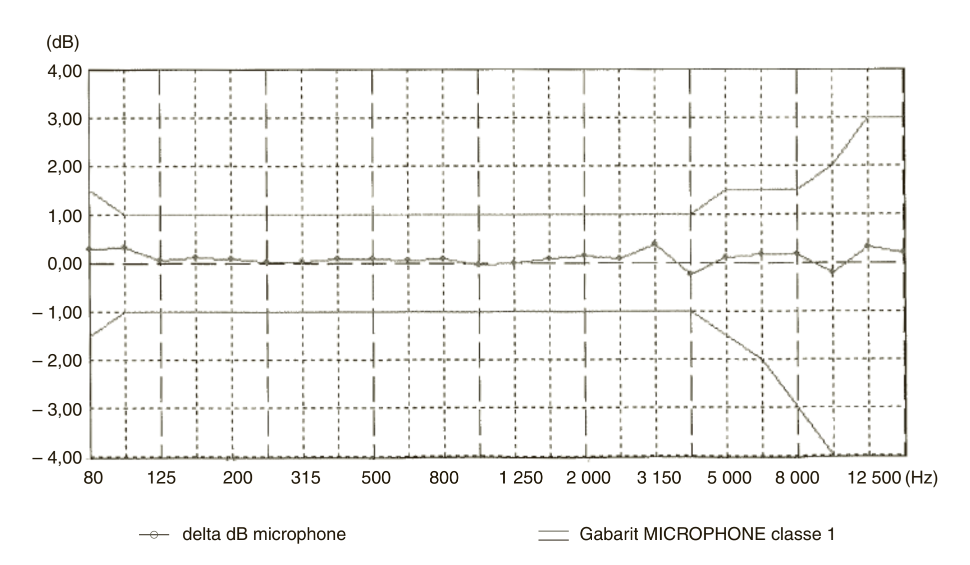


Figure 18.2 - Courbe de réponse d'un microphone 1/2 pouce à électret (Source 01dB-Metravib)

■ Le préamplificateur

Le préamplificateur d'une chaîne de mesure permet de conditionner le signal électrique du microphone pour permettre son analyse par l'analyseur.

G

LES MESURES ACOUSTIQUES ET VIBRATOIRES

Il est inséré entre le microphone et l'analyseur. En général, il est le support du microphone.



Figure 18.3 - Microphone 1/2 pouce et préamplificateur (Source 01dB-Metravib)

■ L'analyseur

L'analyseur va permettre de transformer le signal électrique provenant du préamplificateur en une valeur de niveau de pression acoustique, il va afficher cette valeur sur le cadran de lecture de l'appareil.
L'analyse se fera selon les paramètres recherchés pour la mesure, soit en niveau global pondéré en fréquence A ou C, soit en niveau global non pondéré, soit par bandes de fréquences, soit avec une intégration temporelle longue ou courte, éventuellement avec une combinaison de ces paramètres.
La transformation du signal électrique temporel provenant du microphone en niveau de pression acoustique continu équivalent se fait par intégration de la pression acoustique quadratique moyenne en fonction du temps :

$$L_{\text{eq},\,\tau} = 10 \cdot \lg\left[\frac{1}{\tau}\int_{\tau}\frac{p(t)^2}{p_0^2}\,dt\right]$$

avec :
$p(\mathrm{t})$: pression acoustique instantanée.
p_0 : pression acoustique de référence égale 20 μPa.
τ : constante de temps d'intégration.

Le logarithme utilisé en acoustique est le logarithme décimal qui a comme symbole *lg*, à ne pas confondre avec le logarithme népérien qui a le symbole *ln*.
L'analyseur peut stocker les valeurs de niveau de pression acoustique sur la base de l'intégration temporelle dans sa mémoire interne pour un traitement ultérieur.
Les exigences réglementaires sont données en niveau de pression acoustique continu équivalent pondéré A ou différence de niveau de pression acoustique continu équivalent pondéré A ou par bandes de fréquence (émergence), il faut donc connaître la moyenne de la pression quadratique sur la durée de mesure.
Certains sonomètres donnent uniquement la valeur du niveau de pression acoustique instantané selon une pondération temporelle S (*SLOW* avec un temps d'intégration de 1 s), F (*FAST* avec un temps d'intégration de 125 ms) ou I (*IMPULSE* avec temps d'intégration de 35 ms), la lecture du niveau de pression acoustique dans ce cas-là peut être valide si le bruit mesuré est très stable (variation inférieure à 2 dB durant 1 minute). Dans le cas contraire, la mesure sera inexploitable.

Le niveau de pression acoustique pondéré temporellement correspond à la moyenne de la pression acoustique efficace :

$$L_{A\tau}(t) = 20 \cdot \lg\left\{\left[(1/\tau)\left(\int_{-\infty}^{t} p^2{}_A(\xi)e^{-(t-\xi)/t}d\xi\right)\right]^{1/2}/p_0\right\}$$

avec :
τ = constante de temps exponentielle exprimée en secondes, pour les pondérations temporelles F ou S.
ξ =variable muette d'intégration en fonction du temps depuis un instant indiqué par – ∞ pour la limite inférieure de l'intégrale jusqu'à l'instant d'observation *t*.
$p_A(\xi)$ =pression acoustique instantanée pondérée A.
p_0 =pression acoustique de référence égale 20 µPa.

L'analyse par bandes de fréquences se fait en temps réel au travers d'un analyseur numérique par une Transformée Rapide de Fourier. L'analyse se fait généralement avec des largeurs de bande relatives Δf/f constantes.
Cet analyseur est appelé analyseur FFT (de l'anglais *Fast Fourier Transform*). Les bandes de fréquences les plus utilisées sont les octaves (Δf/f = 70 %) et les tiers d'octaves (Δf/f = 23 %) mais selon la précision que l'on veut obtenir sur l'analyse des niveaux sonores, l'utilisation d'un filtre avec Δf/f plus faible ou un filtre à largeur de bande Δf constant peut être utilisé.
Les fréquences centrales des tiers d'octaves et des octaves sont données dans le chapitre 21.
L'analyseur peut également stocker les valeurs dans une mémoire interne à la chaîne de mesure pour un traitement ultérieur.
Les unités de mesure dont le dB(A) pour le niveau de pression acoustique global pondéré A, le dB(C) pour le niveau de pression acoustique global pondéré C, le dB(Lin) ou dB(Z) pour le niveau de pression acoustique global non pondéré et le dB pour le niveau de pression acoustique mesuré par bandes de fréquences.
Les pondérations A, C et Z sont données dans le chapitre 21.
Certains sonomètres permettent de coder les données durant la mesure. Cette fonction permet de repérer plus facilement les parties que l'on veut conserver pour l'analyse lors du traitement a posteriori.

■ Le calibreur

Le calibreur fait partie intégrante de la chaîne de mesure, il permet d'effectuer un calibrage avant et après chaque série de mesure pour vérifier la dérive de l'appareil. Le calibreur délivre une pression acoustique au microphone de la chaîne de mesure. La fréquence du signal est comprise entre 250 et 1 000 Hz. Le calibreur de classe 1 CAL 21 de chez 01dB-Metravib délivre 1 pascal (94 dB) à la fréquence de 1 000 Hz.



Figure 18.4 – Calibreur de classe 1 CAL 21 (Source 01dB-Metravib)

G

LES MESURES ACOUSTIQUES ET VIBRATOIRES

18.1.2 Principe de mesurage

Le but des mesures acoustiques est de connaître le niveau de pression acoustique en un point donné. À partir de ce niveau de pression acoustique, on peut calculer une puissance acoustique d'appareil, une émergence sonore, vérifier si le niveau reçu correspond aux données du constructeur, aux exigences réglementaires ou contractuelles.
Dans l'environnement, la mesure se fait en positionnant le sonomètre ou le microphone de la chaîne de mesure à l'emplacement défini par la norme de mesure. Comme l'on mesure de la pression acoustique, la distance entre la source et le microphone doit être notée pour éventuellement recalculer le niveau de pression acoustique à une distance différente.
Dans les locaux, la mesure se fait au centre de la pièce ou à la position la plus défavorable, c'est-à-dire celle où le niveau de bruit est le plus élevé (à proximité de l'unité intérieure des climatiseurs…).
Dans le cas des mesures d'exposition sonore quotidienne, le sonomètre peut être utilisé pour des mesures à poste fixe, en le positionnant sur un trépied à proximité de la personne objet des mesures. On peut l'utiliser comme exposimètre mais ses dimensions et son poids ne permettent que des mesures de courte durée de 1 heure maxi. Pour les mesures de longue durée, on lui préférera l'exposimètre qui est plus léger, de taille réduite et donc plus facilement porté par l'opérateur.
Les limites de mesure sont données par le fabricant du matériel. Elles sont détaillées au chapitre 19.

18.2 L'exposimètre

L'exposimètre est également appelé dosimètre, de l'anglais *dosimeter*, et est composé des mêmes éléments que le sonomètre : un microphone, un préamplificateur, un analyseur et un calibreur. L'exposimètre est de classe 2 selon la norme NF EN 61672-1 de juin 2003.
La fonction de l'exposimètre est de mesurer le niveau d'exposition sonore quotidienne des travailleurs et le niveau de pression acoustique de crête durant la journée de travail. La mesure est réalisée à proximité de l'oreille de l'opérateur pour approcher plus précisément le niveau d'exposition sonore quotidienne et le niveau de pression acoustique de crête.
L'avantage de l'exposimètre est sa taille, il est assez petit pour être porté par le travailleur.



Figure 18.5 – Exposimètre WED 007 de classe 2 (Source 01dB-Metravib)

18.2.1 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement de l'exposimètre est similaire à celui du sonomètre (voir paragraphe 18.1.1)

Il doit permettre de mesurer le niveau de pression acoustique global pondéré A, le niveau de pression acoustique pondéré C et le niveau de pression acoustique de crête. Il va afficher la durée de mesure, le niveau d'exposition sonore quotidienne, le niveau de pression acoustique de crête maxi durant la mesure et le nombre de dépassements à une valeur de référence.

18.2.2 Principe de mesurage

À partir de la pression acoustique captée par le microphone, l'exposimètre va calculer le niveau de pression acoustique continu équivalent (L_{Aeq}) sur la durée de mesure. Il va également mesurer le niveau de pression acoustique de crête et retenir le maximum relevé avec le nombre de dépassements aux seuils réglementaires fixés par la directive européenne 2003/10/CE (articles R 4431-2 à 4 du Code du Travail).
Connaissant le niveau de pression acoustique continu équivalent et la durée associée, le niveau d'exposition sonore quotidienne est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$L_{EX,8h} = L^*_{Aeq,TE} + 10 \cdot \lg\left(\frac{T_E}{T_0}\right)$$

Avec :
T_E : durée totale effective de la journée de travail.
T_0 : durée de référence (8 h ou 28 800 s).
$L^*_{Aeq,TE}$: estimateur du niveau acoustique continu équivalent durant T_E, incertitude de mesure incluse.

Le $L^*_{Aeq,TE}$ peut être obtenu à partir d'une mesure en continu ou d'une mesure par échantillonnage (voir le chapitre 19.4 consacré aux mesures d'exposition quotidienne). La norme NF S 31-084 d'octobre 2002 donne plus de détails sur les mesures d'exposition sonore quotidienne, nous invitons le lecteur à se rapprocher de cette norme.

18.3 L'accéléromètre

L'accéléromètre est un capteur de vibrations permettant de connaître le niveau d'accélération vibratoire d'une surface. Cette surface peut être la paroi d'un local, l'enveloppe d'une machine vibrante, d'une canalisation…
La sensibilité de l'accéléromètre est donnée par le constructeur. Plus le capteur est sensible, plus sa taille est importante. La sensibilité de l'accéléromètre est donnée en mV/g ; g étant l'accélération de la gravité donnée égale à 9,81 m/s^2.



Figure 18.6 - Accéléromètre (source 01dB-Metravib)

Les principaux paramètres d'un accéléromètre sont :
- la bande passante (en Hz) ;
- la précision ;
- la sensibilité ;
- la gamme de température d'utilisation (en °C) ;
- la masse du capteur ;
- la sensibilité transversale ;
- le nombre d'axe (1 à 3 axes) ;
- l'électronique intégrée.

L'accéléromètre de base permet la mesure selon une dimension de l'espace (verticale, transversale ou longitudinale dans le cas d'un local). Il existe des accéléromètres triaxiaux permettant la mesure simultanée des niveaux d'accélération selon les trois axes.

18.3.1 Principe de fonctionnement

Certains cristaux comme le quartz ont la propriété de se charger électriquement lorsqu'ils sont soumis à une déformation. C'est le cas de l'accéléromètre qui possède une masse d'inertie venant déformer le cristal, cela permet de recueillir une tension électrique qui est proportionnelle à l'accélération appliquée à la masse.
Le principe des accéléromètres est basé sur la loi fondamentale de la dynamique $F = m.a$ (F : force en N, m : masse en kg, a : accélération en m/s^2 aussi notée γ).
L'accéléromètre est associé à un conditionneur externe ou bien possède de l'électronique intégrée qui met en forme le signal.

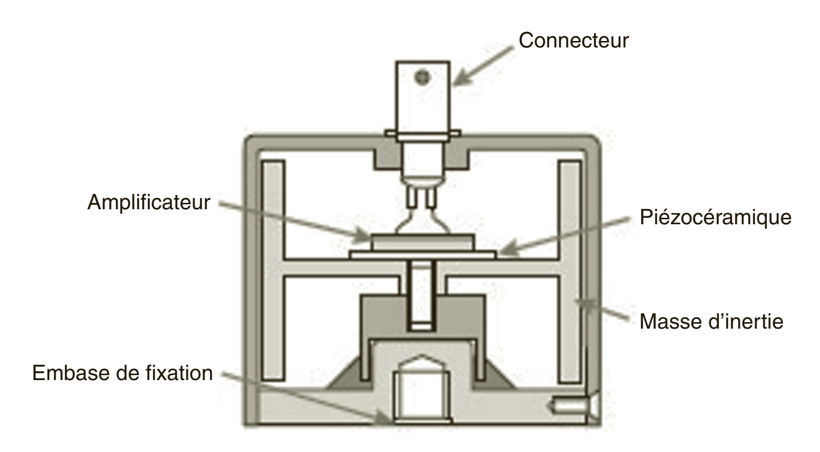


Figure 18.7 - Principe de fonctionnement de l'accéléromètre (source 01dB-Metravib)

Dans tous les cas, l'accéléromètre sera relié à un système d'analyse qui permettra de moyenner le signal en fonction du temps ou de connaître la répartition fréquentielle de l'accélération.
L'unité de l'accélération en niveau global (sur une certaine plage de fréquences), par fréquence ou bandes de fréquences est donnée en m/s^2. On peut également donner le niveau d'accélération en dB mais pour cela, il faut connaître l'accélération

de référence (en général égale à 10^{-6} m/s²). La formule utilisée pour transformer l'accélération a en dB est la suivante :

$$L_a = 20 \cdot \lg\left(\frac{a}{a_0}\right)$$

a = accélération en m/s².
a_0 = accélération de référence égale à 10^{-6} m/s².
L_a = niveau d'accélération (référence 10^{-6} m/s²).

On peut également associer l'accéléromètre à un intégrateur qui permettra de connaître la vitesse vibratoire. Cette analyse de la vitesse peut se faire par l'intermédiaire d'un analyseur depuis un enregistrement du signal temporel avec un échantillonnage adapté.
L'unité de la vitesse vibratoire en niveau global (sur une certaine plage de fréquences), par fréquence ou bandes de fréquences est donnée en m/s. On peut également trouver le niveau de vitesse en dB mais pour cela, il faut connaître la vitesse vibratoire de référence (en général égale à 5.10^{-8} m/s). La formule utilisée pour transformer la vitesse v en dB est la suivante :

$$L_v = 20 \cdot \lg\left(\frac{v}{v_0}\right)$$

v = vitesse vibratoire en m/s.
v_0 = vitesse vibratoire de référence égale à 5.10^{-8} m/s.
L_a = niveau de vitesse vibratoire (référence 5.10^{-8} m/s).

18.3.2 Principe de mesurage

L'opérateur choisira l'accéléromètre correspondant à la mesure à réaliser, en sensibilité, poids et bande passante. L'accéléromètre sera fixé au sol ou sur l'élément à mesurer par de la colle forte, du plâtre, de la cire…

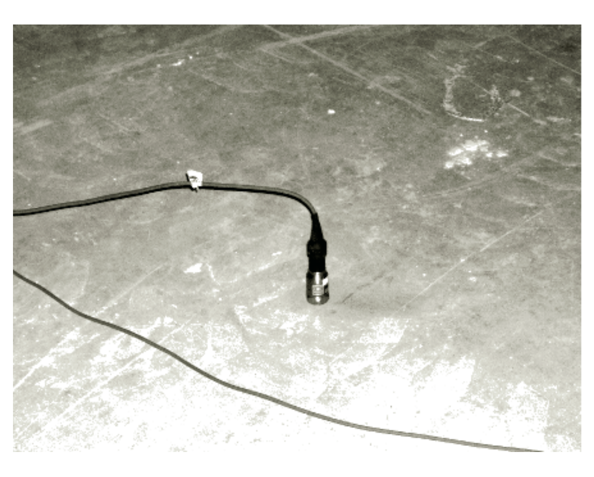


Figure 18.8 - Accéléromètre fixé au sol (source SOCOTEC)

L'acquisition des données se fera sur la base d'une mesure toutes les 20 à 100 ms pour capter les vibrations très brèves.
On veillera à ce que la masse de l'accéléromètre ne modifie pas les vibrations du support. Par exemple, on évitera de fixer un accéléromètre de masse importante sur le carter d'une machine, cela modifierait les modes existants sans l'accéléromètre.

19 • LES MÉTHODES DE MESURAGE

Les mesures acoustiques les plus courantes concernent les bruits des équipements dans l'environnement. Ces mesures sont réalisées pour vérifier que les équipements émettent un niveau de pression acoustique permettant d'être conforme aux exigences réglementaires fixées par les textes législatifs.

D'autres mesures peuvent être réalisées pour vérifier si les caractéristiques acoustiques des installations sont conformes aux données du constructeur. Ces mesures sont réalisées à l'extérieur ou à l'intérieur des locaux.

Dans tous les cas, les contraintes sont les suivantes :

– choix du matériel de mesure ;
– positionnement du matériel ;
– choix de la période d'analyse ;
– choix des paramètres mesurés.

Des limites d'utilisation du matériel de mesure sont données par les fabricants. Nous pouvons citer d'autres limites :

■ Dynamique de mesure

C'est l'étendue de mesure à l'intérieur de laquelle la tension de sortie du microphone est proportionnelle à la pression acoustique. La valeur lue soit en niveau global, soit par bandes de fréquences doit être dans la plage de mesure de l'appareil. Une dynamique élevée ne permettra pas de mesurer efficacement des niveaux faibles et inversement, une dynamique basse ne permettra pas de mesurer des niveaux importants.

Le sonomètre de classe 1 Blue Solo de chez 01dB-Metravib a une dynamique de 117 dB c'est-à-dire que l'on peut réaliser des mesures entre 20 et 137 dB sans modifier la plage de mesure. Cela couvre la quasi-totalité des bruits « courants ».

■ Classe de précision de l'appareil

La classe de mesure correspond à la précision de l'appareil. Elle est définie dans la norme NF EN 61672-1 de juin 2003.

La classe d'un sonomètre est basée sur les limites de tolérance et le domaine de température de fonctionnement.

Les limites de tolérance concernant les spécifications de la classe 2 sont supérieures à celles des spécifications de la classe 1.

Température, hygrométrie

Le fabricant de l'appareil donne les limites d'utilisation des produits en température et en hygrométrie. Les températures froides, inférieures à –10 °C perturbent les mesures car elles rigidifient la membrane du microphone. Le microphone a alors une sensibilité différente de celle donnée à 20 °C. Les valeurs analysées sont fausses. De même, une hygrométrie importante, supérieure à 95 %, peut créer un effet de condensation sur le microphone qui va modifier sa sensibilité. C'est le cas lorsque l'on passe d'un local sec (bureau) à un local humide ou à l'extérieur.

Altitude

Dans les zones d'altitude, la pression atmosphérique diminue, cette baisse de pression a une influence sur le fonctionnement des sonomètres. Des valeurs de correction sont données par les fabricants.

Champs magnétiques et électrostatiques

La présence de champs magnétiques ou électrostatiques importants peut créer des perturbations sur les circuits électroniques et modifier artificiellement les niveaux mesurés. L'utilisation de téléphones portables à proximité immédiate des sonomètres peut provoquer ce type de perturbation.

Vibrations

Des vibrations transmises au microphone ou au sonomètre par l'intermédiaire de son support peuvent provoquer un signal parasite venant perturber les mesures. Il faudra alors vérifier que le support du microphone est stable et qu'il n'est pas soumis à des vibrations importantes ou aléatoires liées au fonctionnement d'un équipement.

Bruit de fond

Le bruit de fond, appelé également bruit résiduel lors des mesures environnementales, peut perturber les mesures. Pour que les valeurs mesurées puissent être exploitées, l'écart entre le bruit de fond en l'absence de la source et le bruit de la source doit être de 10 dB minimum (voir chapitre 21).

Le bruit de fond d'un site extérieur en milieu urbain peut varier de 40 dB(A) entre le jour et les périodes calmes de la nuit. Pour mesurer une source, il faudra choisir la période au cours de laquelle le bruit de fond est compatible avec le niveau de pression acoustique délivré par la source.

Les appareils ont un bruit de fond électronique qu'il faut connaître pour effectuer les mesures des niveaux faibles. Le niveau de bruit de fond du sonomètre Blue Solo de chez 01dB-Metravib est de l'ordre de 10 dB(A). Il permet de mesurer des niveaux sonores à partir de 20 dB(A) sans effectuer de correction.

Dans les autres cas, la correction sera effectuée si le niveau de bruit mesuré est proche du niveau de bruit de fond, en niveau global pondéré ou par bandes de fréquences.

La formule à utiliser est la suivante :

$$L_{p1} = 10 \cdot \lg\left(10^{\frac{L_{p1+2}}{10}} - 10^{\frac{L_{p2}}{10}}\right)$$

Cette formule est à appliquer si la différence entre le bruit de fond et le bruit mesuré est supérieure à 3 dB(A).

■ Écrans

L'interposition d'écrans, par exemple l'opérateur, à proximité du microphone de mesure, va perturber le champ acoustique. L'opérateur ne doit en aucun cas se situer entre la source et le microphone, la distance entre l'opérateur et le microphone doit être supérieure à 1 m.

19.1 Mesures acoustiques dans l'environnement

19.1.1 Mesure des bruits de voisinage à l'extérieur des locaux

■ Domaine d'application

Ces mesures concernent des petites installations de production de froid ou de chaleur (groupe frigorifique, dry cooler, tour aéroréfrigérante) dont la puissance électrique globale absorbée est inférieure à 100 kW. Elles concernent également les caissons de VMC, les CTA…

Elles ne s'appliquent pas aux petites installations si l'établissement est soumis à un classement d'une rubrique des Installations Classées.

Les équipements faisant l'objet des mesures sont en général des équipements des tiers situés à l'extérieur.

■ Moyens de mesurage

La mesure sera réalisée à l'aide d'un sonomètre intégrateur pouvant mesurer au minimum le niveau de pression acoustique continu équivalent pondéré A. La mesure du spectre apportera des indications sur la nature gênante du bruit. Par exemple si un tiers d'octave émerge des autres bandes de fréquence (tonalité marquée définie dans la norme NF S 31-010 de décembre 1996) le bruit peut être gênant même si l'émergence globale mesurée est conforme aux exigences réglementaires.

■ Exigences réglementaires ou normatives

Le résultat des mesures donnera l'émergence en niveau global pondéré A. Ce résultat sera comparé aux exigences du décret 2006-1099 du 31 août 2006 relatif à la lutte contre les bruits de voisinage et modifiant le code de la santé publique. L'émergence est recherchée si le bruit ambiant est supérieur ou égal à 30 dB(A) lorsque les mesures sont faites à l'extérieur.

L'émergence réglementaire est de 5 dB(A) en période diurne entre 7 h et 22 h et de 3 dB(A) en période nocturne entre 22 h et 7 h. À ces valeurs s'ajoute un terme correctif en fonction de la durée cumulée d'apparition du bruit.

Ce terme correctif est égal à :

– 6 pour une durée inférieure ou égale à 1 minute ;
– 5 pour une durée supérieure à 1 minute et inférieure ou égale à 5 minutes ;
– 4 pour une durée supérieure à 5 minutes et inférieure ou égale à 20 minutes ;
– 3 pour une durée supérieure à 20 minutes et inférieure ou égale à 2 heures ;
– 2 pour une durée supérieure à 2 heures et inférieure ou égale à 4 heures ;
– 1 pour une durée supérieure à 4 heures et inférieure ou égale à 8 heures ;
– 0 pour une durée supérieure à 8 heures.

La mesure du spectre par bandes de tiers d'octaves peut être une source d'informations sur la gêne potentielle apportée par le fonctionnement de l'appareil mesuré. L'émergence peut être faible si l'on regarde la variation du niveau global pondéré A mais elle peut être importante sur une bande de fréquence particulière, en basses fréquences et engendrer une gêne lors du fonctionnement de l'appareil.

■ Mode opératoire

□ Position du matériel

Dans le cas d'une source de bruit extérieure au bâtiment, les mesures sont réalisées à l'extérieur, dans la propriété ou en façade des riverains concernés et également à l'intérieur de leur habitation. Pour la méthodologie correspondante, voir le paragraphe 19.1.2 : Mesure des bruits de voisinage à l'intérieur des locaux.

Dans le cas d'un immeuble, pour réaliser les mesures, lorsque la source de bruit est extérieure, le microphone de mesure sera placé à 2 m de la façade ou de la toiture comme indiqué dans la norme NF S 31-110 de novembre 2005 deuxième tirage 2008-07 (Caractérisation et mesurage des bruits de l'environnement – Grandeurs fondamentales et méthodes générales d'évaluation).

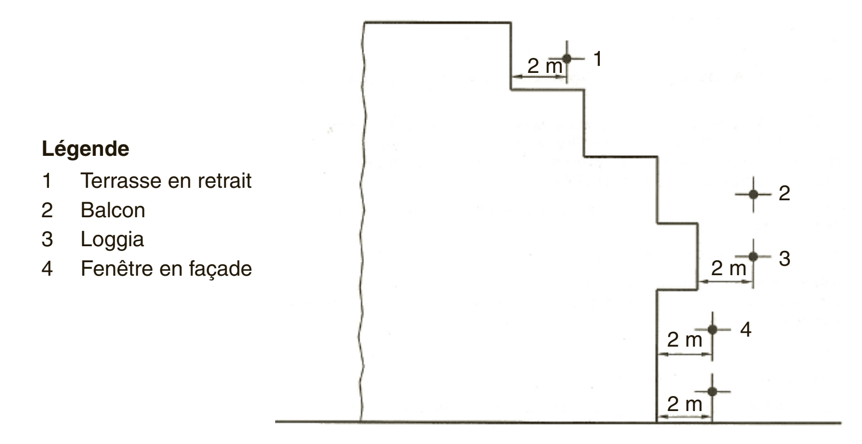


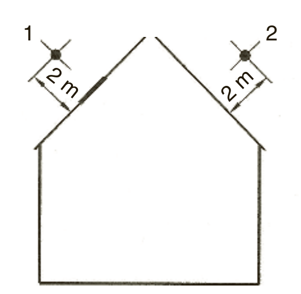
Figure 19.1 - Positionnement du microphone en façade (Source NF S 31-110 : 2005)

Légende

1 Fenêtre en toiture

2 Toiture sans fenêtre

3 Lucarne ou chien-assis



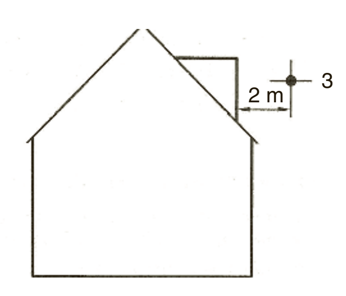


Figure 19.2 - Positionnement du microphone en toiture (Source NF S 31-110 : 2005)



Figure 19.3 - Photographie d'un système d'accrochage sur une fenêtre (Source SOCOTEC)



Figure 19.4 - Photographie d'un système d'accrochage en façade (Source SOCOTEC)

Dans les autres cas, pour une source située à l'extérieur de l'immeuble, la mesure se fera en limite de propriété des tiers, dans une zone représentative de la situation sonore gênante. Le microphone sera placé entre 1,20 et 1,50 m du sol ou de tout obstacle (pour les mesures au sol) et à 2 m au moins de toute surface réfléchissante. Le microphone ou le sonomètre pourra être placé sur un trépied. Dans le cas d'un mur d'enceinte plein, la mesure se fera soit à 1 m au-dessus de l'arrête du mur, soit dans une zone dégagée.



Figure 19.5 - Positionnement du microphone sur pied (Source SOCOTEC)

Lorsque la source est intérieure à l'immeuble, les mesures seront faites en priorité à l'intérieur, chez un tiers, fenêtres fermées, mais si une propagation est possible par l'extérieur (débouché de ventilation…), la mesure peut être réalisée également fenêtres ouvertes.
Le lecteur se rapprochera de la norme NF S 31-010 de décembre 1996 et son amendement NF S 31-010/A1 2° tirage 2009-01 (Caractérisation et mesurage des bruits de l'environnement – Méthodes particulières de mesurage) pour les prescriptions particulières de mesurage.

□ **Paramètres mesurés**

La mesure sera effectuée en choisissant la bonne dynamique, le bon critère d'intégration temporel et le bon paramètre à mesurer. Pour les mesures environnementales relatives à la lutte contre les bruits de voisinage, lors des mesures à l'extérieur, le paramètre à mesurer est le niveau de pression acoustique continu équivalent pondéré A (L_{Aeq}). La base d'intégration d'une seconde permet de satisfaire la quasi-totalité des mesurages. Toutefois, pour affiner les mesures et rendre compte de la gêne lors de bruits impulsionnels, une base d'intégration temporelle plus courte de l'ordre de 20 à 100 ms devra être choisie.

□ **Contraintes lors de la mesure**

Le microphone sera protégé du vent (et éventuellement de la pluie pour des mesures de longue durée) par une bonnette anti-vent ou une boule tout temps.

Cette boule tout temps protège le micro de la pluie, du vent et également des oiseaux, un dispositif empêche les oiseaux de se poser sur la boule tout temps et de produire des bruits parasites.



Figure 19.6 - Boule tout temps (Source 01dB-Metravib)

Dans le cas de l'utilisation de la boule tout temps, le microphone sera en position verticale pour que la protection contre la pluie éventuelle soit efficace.

Durant les mesures, on s'assurera que le bruit résiduel installation à l'arrêt n'est pas trop élevé. En période nocturne, à l'extérieur, le bruit résiduel mesuré à 22 h ou à 3 h du matin peut varier de 10 dB(A). On s'attachera à avoir un bruit résiduel le plus faible possible dans les plages horaires de fonctionnement des installations et à s'assurer que l'équipement mesuré soit en régime de fonctionnement nominal.

La difficulté sera de maîtriser ce paramètre si l'on ne peut agir directement sur l'équipement.

Avant tout mesurage, il faut vérifier que l'appareil de mesure est en ordre de fonctionnement. Si la différence de température ou d'hygrométrie entre le point de mesure et l'endroit de stockage de l'appareil de mesure est importante, on attendra que l'appareil soit stabilisé dans ces nouvelles conditions d'ambiance avant de procéder au calibrage.

Le calibrage s'effectue en mettant le calibreur sur le microphone et en vérifiant que la dérive de l'appareil est inférieure à 0,5 dB par rapport au dernier calibrage. Si l'écart est supérieur à cette valeur, une autovérification de l'appareil doit être envisagée. Un calibrage sera également réalisé à la fin de la mesure, si l'écart de calibrage est supérieur à 0,5 dB, la mesure sera rejetée et devra être refaite à l'aide d'un autre matériel de mesure.

Les limites de la mesure, mises à part les limites données dans la description des appareils de mesure, concernent la distance entre la source et le point de mesure en fonction de l'encombrement de la source. Si l'on veut mesurer le bruit provenant de l'ensemble de la source et pas d'une partie seulement, la distance entre la source et le microphone devra être supérieure à la plus grande dimension de la source divisée par 3.

Lors des mesures, on vérifiera que les conditions météorologiques sont favorables. Il faut que le vent soit faible (un vent fort supérieur à 5 m/s engendre des bruits perturbateurs dans l'environnement comme le bruit des feuilles dans les arbres), pas de pluie ou pluie fine (le bruit de la pluie sur le sol ou sur la protection du microphone engendre des bruits parasites). La norme NFS 31-010 de décembre 1996 et son amendement NF S 31-010/A1 (deuxième tirage 2009-01) donnent des indications des effets météorologiques sur la propagation du son. Par exemple, un vent fort de 3 à 5 m/s portant, de jour avec un fort ensoleillement et une surface sèche ou un vent faible contraire, de nuit avec un ciel dégagé conduisent à un renforcement faible du niveau sonore pour une distance source récepteur supérieure à 40 m.

□ **Analyse des résultats**

Les exigences sont basées sur la valeur mesurée de l'émergence (différence entre le niveau de pression acoustique continu équivalent du bruit ambiant et le niveau de pression acoustique continu équivalent du bruit résiduel pondérés A) avec un terme correctif selon la durée d'apparition du bruit particulier. Les mesures sont réalisées durant 1/2 heure minimum avec des phases comprenant l'apparition et l'arrêt du bruit de l'équipement objet des mesures.

On peut également mesurer l'émergence sur une octave ou un tiers d'octave particulier pour mettre en évidence la gêne liée au fonctionnement des installations. C'est pourquoi le bruit résiduel est très important et ne doit pas varier entre sa mesure et celle du bruit ambiant.

Le dépouillement des mesures peut être fait en lecture directe ou différée. La lecture directe nous donne la valeur du paramètre mesuré (par exemple le L_{Aeq}) avec l'intégration de tous les bruits perçus lors de la mesure. Pour connaître le L_{Aeq} sans les évènements perturbateurs intervenus lors de la mesure (passage d'une voiture, aboiement d'un chien…) il est alors nécessaire de faire une analyse différée, ces évènements peuvent être exclus de l'analyse.

Dans tous les cas, les évènements extérieurs doivent apparaître dans la mesure du bruit résiduel et du bruit ambiant. Un événement ponctuel extérieur peut augmenter significativement la valeur du bruit résiduel ou du bruit ambiant (voir chapitre 21 : Rappels d'acoustique) en ne reflétant pas l'ambiance acoustique réelle du site.

Dans le cas d'un fonctionnement d'équipement émettant un bruit stable, l'analyse statistique permet de connaître les valeurs des critères mesurés en faisant abstraction des bruits parasites. Le L_{90} par exemple nous donne le bruit de fond en faisant abstraction des niveaux forts. (voir analyse statistique au chapitre 21).

La précision de la mesure vient principalement de la classe de l'appareil. Un groupe de travail est chargé de définir l'incertitude de mesure pour les mesures environnementales. Le résultat des travaux n'est pas publié à la date de rédaction du présent ouvrage.

19.1.2 Mesure des bruits de voisinage à l'intérieur des locaux

■ **Domaine d'application**

Cela concerne les bruits émis par les équipements des tiers extérieurs au local de mesure. Par exemple un groupe frigorifique, une chaufferie, etc., équipements qui sont dans un local différent de celui où s'effectue la mesure.

Le bruit est transmis par voie aérienne mais bien souvent par voie solide. Il peut s'agir de vibrations émises par une pompe ou par des canalisations lors de la circulation de fluide mettant en vibration la structure du local de réception et générant un bruit aérien par rayonnement de ses parois.

■ Moyens de mesurage

Le matériel de mesure sera identique à celui utilisé pour les mesures à l'extérieur (voir paragraphe précédent : Mesure des bruits de voisinage à l'extérieur des locaux), les protections du microphone contre la pluie ou le vent peuvent ne pas être mises en place.
Le matériel de mesure devra analyser au minimum le niveau de pression acoustique continu équivalent pondéré A et les bandes d'octaves.
La base d'intégration d'une seconde permet de satisfaire la quasi-totalité des mesurages. Toutefois, pour affiner les mesures et rendre compte de la gêne lors de bruits impulsionnels, une base d'intégration temporelle plus courte de l'ordre de 20 à 100 ms pourra être choisie.

■ Exigences réglementaires ou normatives

Le résultat des mesures sera l'émergence en niveau global pondéré A et par bandes d'octaves normalisées centrées sur 125 à 4 000 Hz. Ce résultat sera comparé aux exigences du décret 2006-1099 du 31 août 2006 relatif à la lutte contre les bruits de voisinage et modifiant le code de la santé publique. L'émergence globale ou spectrale est recherchée si le bruit ambiant est supérieur ou égal à 25 dB(A) lorsque les mesures sont faites à l'intérieur des locaux. L'émergence réglementaire du niveau global pondéré A est de 5 dB(A) en période diurne entre 7 h et 22 h et de 3 dB(A) en période nocturne entre 22 h et 7 h. À ces valeurs s'ajoute un terme correctif en fonction de la durée cumulée d'apparition du bruit (voir la rubrique « Exigences réglementaires ou normatives » du paragraphe précédent).
L'émergence spectrale est limitée à 7 dB pour les octaves 125 et 250 Hz et à 5 dB pour les octaves 500, 1 000, 2 000 et 4 000 Hz quelle que soit la durée d'apparition du bruit.
La mesure du spectre par bandes de tiers d'octaves peut être une source d'informations sur la gêne potentielle apportée par le fonctionnement de l'appareil mesuré. L'émergence peut être faible si l'on regarde la variation du niveau global pondéré A mais elle peut être importante sur une bande de fréquence particulière, en basses fréquences et engendrer une gêne lors du fonctionnement de l'équipement.

■ Mode opératoire

□ Position du matériel

À l'intérieur des locaux, le matériel de mesure sera positionné au centre de la pièce, entre 1,20 et 1,50 m au-dessus du plancher et à 1 m de toute paroi ou autre grande surface réfléchissante. Les fenêtres et les portes sont généralement fermées mais si la voie de propagation est extérieure, la mesure peut être réalisée fenêtres ouvertes. Dans tous les cas, si la mesure résulte d'une plainte, le microphone sera placé, en supplément des positions données dans la norme NF S 31-010 de décembre 1996

et son amendement NF S 31-010/A1 2° tirage 2009-01, aux emplacements où le plaignant se sent gêné dans les conditions de gêne. Ces conditions seront notées dans le compte rendu de mesure.

☐ Paramètres mesurés

La mesure sera effectuée en choisissant la bonne dynamique, le bon critère d'intégration temporel et le bon paramètre à mesurer. Pour les mesures relatives à la lutte contre les bruits de voisinage, lors des mesures à l'intérieur des locaux, les paramètres à mesurer sont le niveau de pression acoustique continu équivalent pondéré A (L_{Aeq}) et les niveaux de pression acoustique continue équivalent par bandes d'octaves entre 125 Hz et 4 000 Hz. La base d'intégration d'une seconde permet de satisfaire la quasi-totalité des mesurages. Toutefois, pour affiner les mesures et rendre compte de la gêne lors de bruits impulsionnels, une base d'intégration temporelle plus courte de l'ordre de 20 à 100 ms devra être choisie.

☐ Contraintes lors de la mesure

Avant tout mesurage, il faudra vérifier que l'appareil de mesure est ordre de fonctionnement. Si la différence de température ou d'hygrométrie entre le point de mesure et l'endroit de stockage de l'appareil de mesure est importante, on attendra que l'appareil soit stabilisé dans ces nouvelles conditions d'ambiance avant de procéder au calibrage.

Le calibrage s'effectue en mettant le calibreur sur le microphone et en vérifiant que la dérive de l'appareil est inférieure à 0,5 dB par rapport au dernier calibrage. Si l'écart est supérieur à cette valeur, une autovérification de l'appareil doit être envisagée. Un calibrage sera également réalisé à la fin de la mesure, si l'écart de calibrage est supérieur à 0,5 dB, la mesure sera rejetée et devra être à nouveau réalisée à l'aide d'un autre matériel de mesure.

La difficulté de la mesure sera de maîtriser la marche et l'arrêt ainsi que le régime de fonctionnement des équipements objets des mesures.

Le bruit résiduel sera également à surveiller, dans les locaux habités, on peut avoir des bruits parasites venant perturber la mesure : ordinateurs, réfrigérateurs, pompe d'aquarium…

☐ Analyse des résultats

Les exigences sont basées sur la valeur mesurée de l'émergence (différence entre le niveau de pression acoustique continu équivalent du bruit ambiant et le niveau de pression acoustique continu équivalent du bruit résiduel) pondérés A avec un terme correctif selon la durée d'apparition du bruit particulier. Les mesures sont réalisées durant 1/2 heure minimum avec des phases comprenant l'apparition et l'arrêt du bruit de l'équipement.

On doit également mesurer l'émergence sur une bande octave entre 125 Hz et 4 000 Hz.

Le bruit résiduel est très important et ne doit pas varier entre sa mesure et celle du bruit ambiant.

Le dépouillement des mesures peut être fait en lecture directe ou différée. La lecture directe nous donne la valeur du paramètre mesuré (par exemple le L_{Aeq} ou le L_{eq} pour la bande d'octave considérée) avec l'intégration de tous les bruits perçus lors de la mesure. Pour connaître le L_{Aeq} sans les évènements perturbateurs intervenus lors de la mesure (passage d'une voiture, bruits intérieurs à l'immeuble…) il est alors nécessaire de faire une analyse différée, ces évènements peuvent être exclus de l'analyse.

Dans tous les cas, les évènements extérieurs au bruit de l'équipement doivent apparaître dans la mesure du bruit résiduel et du bruit ambiant. Un événement ponctuel extérieur peut augmenter significativement la valeur du bruit résiduel ou du bruit ambiant (voir chapitre 21 : Rappels d'acoustique) en ne reflétant pas l'ambiance acoustique réelle du lieu.

Dans le cas d'un fonctionnement d'équipement émettant un bruit stable, l'analyse statistique permet de connaître les valeurs des critères mesurés en faisant abstraction des bruits parasites. Le L_{90} par exemple nous donne le bruit de fond en faisant abstraction des niveaux forts (voir analyse statistique chapitre 21) .

La précision de la mesure vient principalement de la classe de l'appareil. Un groupe de travail est chargé de définir l'incertitude de mesure pour les mesures environnementales. Le résultat des travaux n'est pas publié à la date d'impression du présent ouvrage.

19.1.3 Mesure des bruits des installations classées

■ Domaine d'application

Les Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) sont soit soumises à déclaration, soit soumises à autorisation selon la puissance des équipements ou le volume de stockage de matières à risque.

Dans tous les cas, quelle que soit l'origine de la déclaration ou de l'autorisation d'exploiter, la mesure réglementaire doit prendre en compte l'ensemble des bruits de l'ICPE. Dans ces bruits sont également compris les mouvements de véhicules à l'intérieur du site industriel.

■ Moyens de mesurage

La mesure sera réalisée à l'aide d'un sonomètre intégrateur. L'opérateur pourra utiliser un sonomètre de classe 2 dans le cas de la mesure selon la méthode de contrôle définie dans la norme NF S 31-010 de décembre 1996 pour des émergences supérieures à 3 dB(A). Dans les autres cas, y compris la recherche de tonalité marquée ou de bruits impulsionnels, le sonomètre sera de classe 1.

La durée d'acquisition sera par défaut d'une seconde. Pour la recherche de bruits impulsionnels, la durée d'acquisition sera de 100 ms.

■ Exigences réglementaires ou normatives

Les exigences de niveau en limite de propriété et les valeurs d'émergence sont différentes selon les périodes de jour ou de nuit. Elles sont également différentes selon si l'on est en semaine ou le dimanche.

En limite de propriété, le niveau de pression acoustique continu équivalent est comparé aux exigences réglementaires.

Pour les ICPE soumises à autorisation, la limite est fixée par l'arrêté d'autorisation d'exploiter, à défaut, ce sont les exigences de l'arrêté du 23 janvier 1997 qui s'appliquent (70 dB(A) en période diurne entre 7 h et 22 h et 60 dB(A) en période nocturne entre 22 h et 7 h). Chez les tiers, l'émergence à respecter est définie dans l'arrêté d'autorisation d'exploiter pour les ICPE soumises à autorisation à défaut, ce sont les exigences de l'arrêté du 23 janvier 1997 qui s'appliquent.

Tableau 19.1 – Émergences selon l'arrêté du 23 janvier 1997 (source *JO*)

Niveau de bruit ambiant existant dans les zones à émergence réglementée (incluant le bruit de l'établissement)	Émergence admissible pour la période allant de 7 heures à 22 heures, sauf dimanches et jours fériés	Émergence admissible pour la période allant de 22 heures à 7 heures, ainsi que les dimanches et jours fériés
Supérieur à 35 dB (A) et inférieur ou égal à 45 dB (A)	6 dB (A)	4 dB (A)
Supérieur à 45 dB (A)	5 dB (A)	3 dB (A)

Certaines installations classées sont régies par des arrêtés de prescriptions spécifiques fixant des exigences qui, pour la plupart, sont inspirées de l'arrêté du 23 janvier 1997.

Pour les ICPE soumises à déclaration, l'arrêté du 20 août 1985 fixe des niveaux L_{Lim} à respecter en limite de propriété selon l'environnement de l'ICPE, la valeur de l'émergence entre le niveau de réception L_R et le niveau de bruit résiduel L_I est limitée à 3 dB(A) dans cet arrêté.

La valeur en limite de propriété de l'ICPE L_{Lim} est donnée par l'addition de 45 dB(A) + C_T + C_Z.

La valeur de L_R chez les riverains est donnée par l'addition de $L_{Aeq} + C_1 + C_2$ avec L_{Aeq} niveau de pression acoustique continu équivalent pondéré A issu de la mesure, C_1 un terme additionnel en présence de sons impulsionnels et C_2 un terme additionnel en présence de sons purs à tonalité marquée. La définition d'un son impulsionnel ou une tonalité marquée est donnée plus loin dans le présent chapitre.

Le terme C_T correspond à la période d'exploitation de l'ICPE dans la journée, le terme C_Z correspond au type d'environnement de l'ICPE. Les différentes valeurs sont données dans les tableaux qui suivent.

La période de jour est la période 7 h – 20 h, la période intermédiaire est la période 6 h – 7 h ainsi que la période 20 h – 22 h, la période de nuit est la période 22 h – 6 h.

Tableau 19.2 – Coefficients C_T de l'arrêté du 20 août 1985 (source *JO*)

Période de la journée	Terme correctif — C_T en décibels
Jour	0
Période intermédiaire	– 5
Nuit	– 10

Tableau 19.3 – Coefficients C_Z de l'arrêté du 20 août 1985 (source *JO*)

Type de zone	Terme correctif C_Z à la valeur de base en décibels
Zone d'hôpitaux, zone de repos, aires de protection d'espaces naturels	0
Résidentielle, rurale ou suburbaine, avec faible circulation de trafic terrestre, fluvial ou aérien	+5
Résidentielle urbaine	+10
Résidentielle urbaine ou suburbaine, avec quelques ateliers ou centres d'affaires, ou avec des voies de trafic terrestre, fluvial ou aérien assez importantes, ou dans les communes rurales : bourgs, villages et hameaux agglomérés	+15
Zone à prédominance d'activités commerciales, industrielles ainsi que les zones agricoles situées en zone rurale non habitée ou comportant des écarts ruraux	+20
Zone à prédominance industrielle (industrie lourde)	+25

Une ICPE située dans une zone résidentielle urbaine qui fonctionne en période de jour aura donc deux exigences. La première de ne pas dépasser 55 dB(A) sur sa limite de propriété ou celle des tiers (45 dB(A) + C_T + C_Z = 45 + 10 + 0) ; la deuxième de ne pas dépasser une émergence de 3 dB(A) en limite de propriété des tiers.

À noter que les valeurs de L_{Lim} peuvent être différentes en limite de propriété industrielle et celle des tiers si les zones respectives sont différentes (voir figure 19.7).

Le lecteur se rapprochera de la norme NF S 31-010 de décembre 1996 et de l'annexe de l'arrêté du 23 janvier 1997. La méthode de mesure définie dans l'annexe de l'arrêté du 23 janvier 1997 s'applique à l'ensemble des installations classées soumises à autorisation ou a déclaration.

De plus, il faut vérifier si les niveaux sonores ne comportent pas de sons impulsionnels ou de sons à tonalité marquée pendant 30 % du temps de fonctionnement de l'établissement dans chaque période réglementaire chez les riverains en ZER.

Selon les définitions de la norme NF S 31-010, un son à tonalité marquée est un son dont la différence de niveau entre une bande de tiers d'octave et les quatre bandes de tiers d'octaves les plus proches (les deux immédiatement supérieures et les deux immédiatement inférieures) atteint ou dépasse les valeurs suivantes :

Tableau 19.4 – Exigences de tonalité marquée (source NF S 31-010)

Cette analyse se fera à partir d'une acquisition minimale de 10 s		
50 Hz à 315 Hz	400 Hz à 1 250 Hz	1 600 Hz à 8 000 Hz
10 dB	5 dB	5 dB

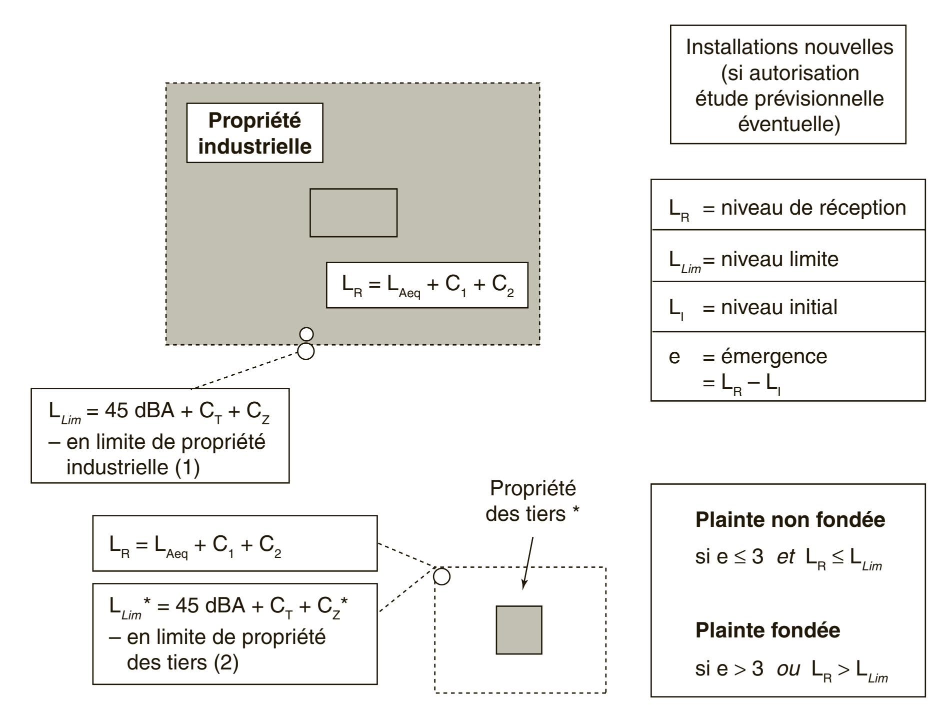


Figure 19.7 - Principe de validation des mesures de l'arrêté du 20 août 1985 (source *JO*)

Selon les définitions de la norme NF S 31-010, un bruit impulsionnel est un bruit consistant en une ou plusieurs impulsions d'énergie acoustique, ayant chacune une durée inférieure à 1 s et séparée par des intervalles de temps de durées supérieures à 0,2 s.

■ Mode opératoire

□ Position du matériel

Le principe de mesure est identique pour les ICPE soumises à autorisation ou à déclaration, il est basé sur la mesure des niveaux en limite de propriété et de la mesure d'émergence chez les tiers en zone à émergence réglementée. Ces zones sont les parties intérieures des immeubles tiers existants et éventuellement les parties extérieures (cour, jardin, etc.) ainsi que les zones constructibles à proximité de l'installation classée à l'exception des zones artisanales. La définition des zones à émergence réglementée est donnée dans l'arrêté du 23 janvier 1997 relatif à la limitation du bruit émis par les ICPE.

L'appareil de mesure sera mis en place en limite de propriété du site industriel et éventuellement dans les zones à émergence réglementée. La position de l'appareil de mesure sera identique à celle indiquée pour les mesures de la gêne de voisinage (voir paragraphes précédents).

☐ Paramètres mesurés

Les paramètres à mesurer sont le L_{Aeq} en limite de propriété du site et le L_{Aeq} ainsi que les bandes de tiers d'octaves chez les riverains dans les zones à émergence réglementée.

La mesure peut s'effectuer par échantillonnage ou en continu sur la période d'exploitation. Dans le cas de la mesure par échantillonnage, il faudra s'assurer que les échantillons sont représentatifs de l'activité de l'installation classée. On s'assurera que les installations sont en régime nominal lors des mesures, que les bruits ponctuels de l'activité ont bien été pris en compte (départ de camions, fonctionnement régulé d'un équipement…).

En limite de propriété l'appareil de mesure devra fournir les niveaux de pression acoustique continus équivalents pondérés A sur la période de jour (7 h à 22 h) et de nuit (22 h à 7 h).

Chez les tiers, l'appareil de mesure devra fournir également les niveaux de pression acoustique continus équivalents pondérés A et les indices statistiques sur la période de jour (7 h à 22 h) et de nuit (22 h à 7 h) dans la limite des horaires d'exploitation du site. De plus, la vérification de la présence de sons impulsionnels ou à tonalité marquée au sens de la norme NFS31-010 devra être effectuée. Pour cela l'appareil devra mesurer les niveaux sonores avec une base d'intégration de 100 ms et devra également analyser les bandes de tiers d'octaves.

☐ Contraintes lors de la mesure

Les contraintes de mesure sont similaires à celles évoquées pour les mesures du bruit de voisinage (voir paragraphes précédents).

Pour la mesure d'émergence, dans le cas d'un site industriel, il est très difficile de mettre à l'arrêt l'ensemble du site pour mesurer le bruit résiduel. Quelquefois, le site est mis à l'arrêt sur une période très courte, la représentativité du bruit résiduel est contestable dans ce cas-là. Soit il est pris durant une période très calme (au milieu de la nuit), soit il est pris durant une période bruyante. La solution passe par la mise en place d'un point de mesure supplémentaire, dans une zone non influencée par le bruit du site mesuré et influencée par les autres sources de bruit. Dans ce cas, on pourra calculer l'émergence avec plus de précision.

Lors des mesures, on vérifiera que les conditions météorologiques sont favorables. Il faut que le vent soit faible (un vent fort supérieur à 5 m/s engendre des bruits perturbateurs dans l'environnement comme le bruit des feuilles dans les arbres), pas de pluie ou pluie fine (le bruit de la pluie sur le sol ou sur la protection du microphone engendre également des bruits parasites). La norme NFS 31-010 de décembre 1996 et son amendement NF S 31-010/A1 (deuxième tirage 2009-01) donnent des indications des effets météorologiques sur la propagation du son.

☐ Analyse des résultats

En limite de propriété l'exigence réglementaire est basée sur les niveaux de pression acoustique continus équivalents pondérés A sur la période de jour (7 h à 22 h) et de nuit (22 h à 7 h).

Le calcul de l'émergence dans les zones à émergence réglementée se fera en effectuant la différence entre le bruit ambiant et le bruit résiduel. Pour les installations classées soumises à autorisation, le calcul de l'émergence est effectué sur la base du niveau de pression acoustique continu équivalent pondéré A. Dans le cas d'un bruit résiduel comprenant des niveaux forts de façon régulière (trafic pulsé par exemple), si l'écart entre le L_{Aeq} et l'indice statistique L_{50} est supérieur à 5 dB(A), on choisira comme descripteur acoustique le L_{50} pour le bruit résiduel et le bruit ambiant. L'émergence sera alors calculée sur la différence entre le L_{50} du bruit ambiant et le L_{50} du bruit résiduel.
La précision de la mesure vient principalement de la classe de l'appareil. Un groupe de travail est chargé de définir l'incertitude de mesure pour les mesures environnementales. Le résultat des travaux n'est pas publié à la date de rédaction du présent ouvrage.

19.2 Mesures acoustiques dans les locaux

■ Mesure des bruits dans les locaux

□ Domaine d'application

Dans les locaux, les différentes mesures qui peuvent être réalisées sont, mis à part les bruits de voisinage et la mesure de puissance acoustique, la mesure des critères de confort définis dans une réglementation, un cahier des charges ou une norme (par exemple NF S 31-080 de janvier 2006 pour les bureaux).
Ces mesures s'appliquent aux équipements terminaux installés dans les locaux (bouches de diffusion de l'air, ventilo-convecteurs, unité intérieure des climatiseurs, etc.).

□ Moyens de mesurage

L'appareil de mesure devra permettre la mesure selon la constante temporelle *SLOW* du niveau de pression acoustique maximum pondéré A ainsi que du niveau de pression acoustique maximum dans les bandes d'octaves normalisées entre 31,5 et 8 000 Hz pour les courbes NR et entre 63 et 8 000 Hz pour les courbes NC (voir définition des constantes d'intégration temporelle en annexe au chapitre 21). La durée de réverbération du local de réception devra également être mesurée.

□ Exigences réglementaires ou normatives

Les critères à respecter sont généralement le niveau de pression acoustique normalisé maximum pondéré A en constante d'intégration temporelle *SLOW* et les courbes NR ou NC.

■ Mode opératoire

Le lecteur se rapprochera de la norme NF S 31-057 (vérification de la qualité acoustique des bâtiments) d'octobre 1982 pour réaliser les mesurages de contrôle.
Il existe une autre norme amenée à remplacer la norme NF S 31-057, il s'agit de la norme NF EN ISO 10052 de septembre 2005 mais aucune exigence réglementaire n'impose cette norme pour les essais.

Dans le cas de mesures selon la méthode d'expertise, la norme NF EN ISO 16032 d'avril 2005 sera à appliquer.
Le présent paragraphe détaille les principes de la norme de contrôle.

☐ Position du matériel

L'appareil de mesure sera mis en place au centre du local et différents points représentatifs de l'ambiance sonore du local. Dans le cas de postes de travail existants, les mesures seront effectuées également à des emplacements représentatifs de ces postes de travail. Le niveau de pression acoustique le plus élevé correspond généralement à la position directement sous une bouche de soufflage ou de reprise ou bien au centre de plusieurs emplacements de bouches de ventilation.

☐ Paramètres mesurés

Les paramètres mesurés seront le niveau de pression acoustique maximum en constante d'intégration temporelle *SLOW* global pondéré A ainsi de chaque bande d'octave entre 31,5 et 8 000 Hz. Comme ces équipements ont un fonctionnement continu, la valeur relevée sera la valeur maximale selon la constante temporelle *SLOW* sur une durée de mesure de 30 s environ.
Le bruit résiduel sera mesuré pour vérifier si le niveau relevé dans certaines bandes d'octaves provient bien de l'équipement mesuré.
La durée de réverbération du local de réception sera également mesurée.

☐ Contraintes lors de la mesure

Le bruit mesuré provient généralement des bouches de ventilation du local. Le bruit peut avoir plusieurs origines :
- le bruit du ventilateur ou de l'équipement transmis par le réseau de ventilation ;
- le bruit issu des vibrations des conduits ou de l'équipement ;
- le bruit aéraulique dans le conduit ;
- le bruit de passage de l'air dans la bouche ;
- le bruit provenant des autres locaux par interphonie (la bouche de ventilation du local voisin laisse passer le bruit de la pièce vers la pièce voisine par l'intermédiaire du conduit et de la bouche dans le local de réception).

L'opérateur s'assurera que les équipements sont en fonctionnent nominal avant de réaliser les mesurages.

☐ Analyse des résultats

Une correction sera réalisée tel qu'indiqué au chapitre 19 (Méthodes de mesurage acoustique – Bruit de fond).
La durée de réverbération devra également être mesurée. En effet, pour calculer le niveau de pression acoustique normalisé, une correction de durée de réverbération est à réaliser (voir chapitre 21 : Rappels d'acoustique – Niveau normalisé).
Le résultat du niveau de pression acoustique normalisé maximum selon la constante temporelle *SLOW* par bandes d'octaves sera reporté sur les réseaux de courbes NR ou NC selon les cas, la valeur retenue correspond à la courbe la plus haute qui tangente la courbe du spectre mesuré.

Le résultat du niveau de pression acoustique normalisé maximum selon la constante temporelle *SLOW* globale pondérée A sera comparé aux exigences réglementaires, contractuelles ou normatives.

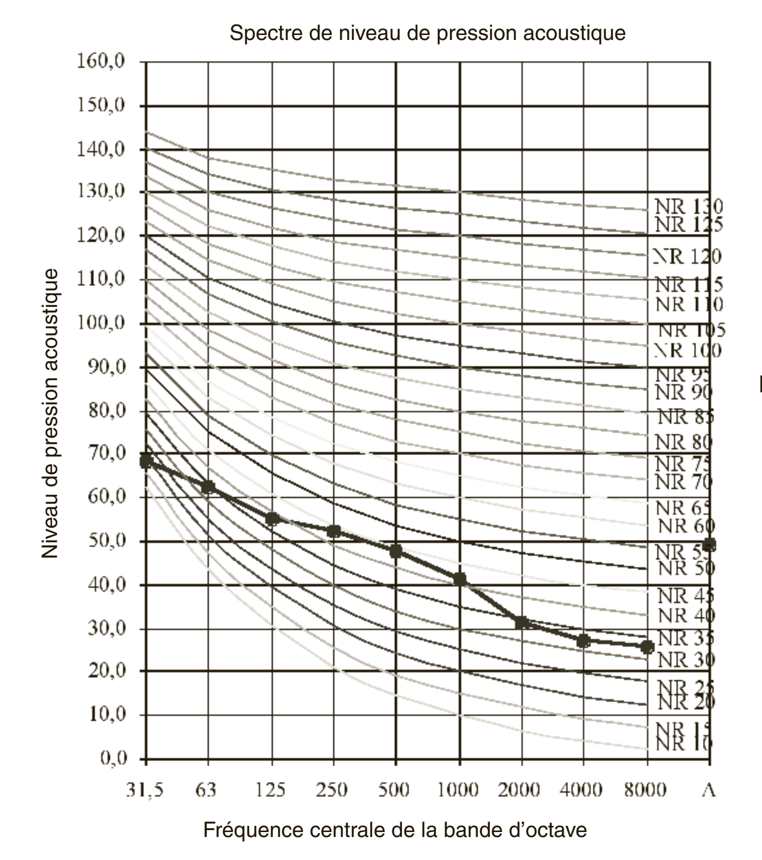


Figure 19.8 - Spectre reporté sur le réseau de courbes NR (valeur mesurée 49,2 dB(A) et NR 45)

L'incertitude sur la mesure est généralement fixée par des textes réglementaires à 3 dB(A) en niveau global et 3 dB par bandes de fréquences. Pour un niveau normalisé fixé à 35 dB(A), un niveau mesuré à 38 dB(A) sera considéré comme conforme aux exigences en prenant en compte l'incertitude sur la mesure.

19.3 Puissance acoustique des sources

■ **Mesure de la puissance acoustique des sources**

□ **Domaine d'application**

Ces mesures concernent des installations de production de froid ou de chaleur (groupe frigorifique, dry cooler, tour aéroréfrigérante, CTA…).
La mesure de puissance acoustique de l'équipement concerné se fait à partir de la mesure de pression acoustique à une certaine distance, l'équipement mesuré étant généralement sur plan réfléchissant en champ libre (absence d'obstacles réfléchissant le son autour de l'appareil) pour la mesure d'expertise ou de contrôle.

Nous avons exclu la méthode de mesure de laboratoire où la source est installée dans salle semi-anéchoïque (parois verticales et plafond fortement absorbants et sol réfléchissant).

□ Moyens de mesurage

L'appareillage de mesure sera de type sonomètre intégrateur permettant de mesurer le niveau de pression acoustique continu équivalent pondéré A pour la méthode de contrôle et le niveau de pression acoustique continu équivalent pondéré A ainsi que les bandes de tiers d'octaves pour la méthode d'expertise.
Le sonomètre utilisé doit être au minimum de classe 2 pour la mesure de la puissance acoustique des sources selon la méthode de contrôle et de classe 1 pour la mesure selon la méthode d'expertise. La définition des classe 1 et 2 est donnée au chapitre 21.

□ Exigences réglementaires ou normatives

Les normes de mesure « Détermination des niveaux de puissance acoustique des sources de bruit à partir de la pression acoustique » EN ISO 3744 (Méthode d'expertise) et NF EN ISO 3746 (Méthode de contrôle) détaillent le mode opératoire. Le lecteur devra se rapprocher de ces normes et les appliquer pour réaliser les mesures.
Il n'y a pas d'exigence réglementaire ou normative concernant la limitation du bruit mesuré. Ces mesures permettent de connaître la puissance acoustique de la source et le marquage l'appareil

■ Mode opératoire

□ Position du matériel

Le principe de la mesure est d'effectuer un maillage selon une demi-sphère ou un parallélépipède autour de la source. La distance entre les points du maillage et la distance entre le point de mesure et la source est fonction de la taille et de la forme de la source.

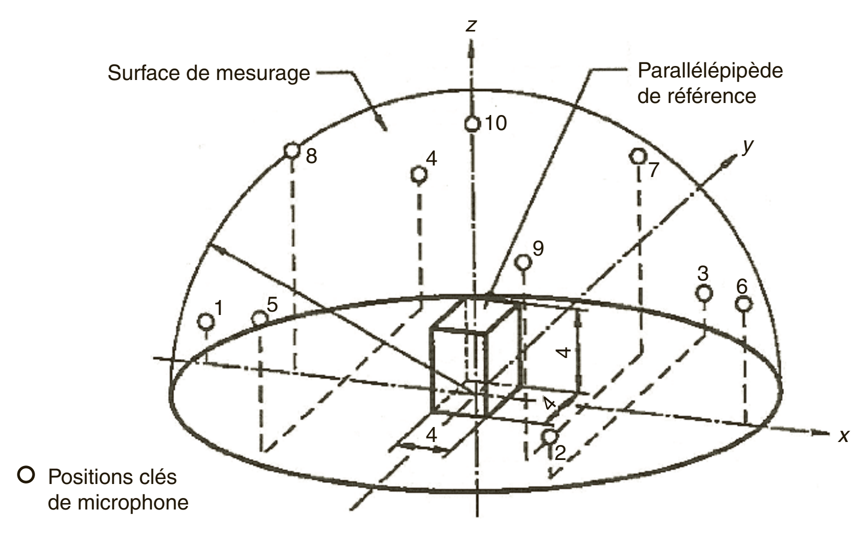


Figure 19.9 - Maillage selon une 1/2 sphère (source NF EN ISO 3744 : 1995)

G

LES MESURES ACOUSTIQUES ET VIBRATOIRES

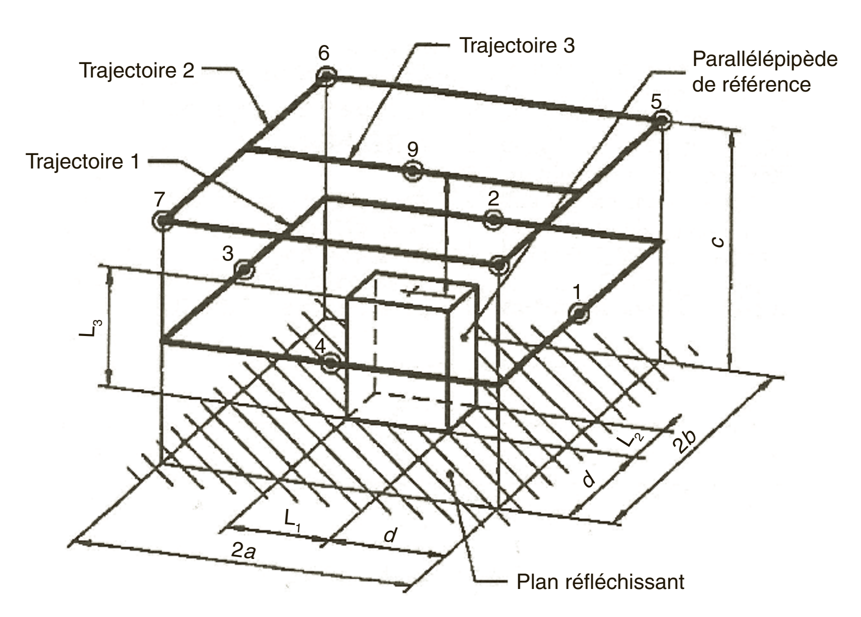


Figure 19.10 - Maillage selon un parallélépipède (source NF EN ISO 3744 : 1995)

□ Paramètres mesurés

Le paramètre mesuré est le niveau de pression acoustique temporel moyen pondéré A avec un sonomètre intégrateur pour la méthode de contrôle.

Pour la méthode d'expertise, les paramètres mesurés sont le niveau de pression acoustique pondéré A et le niveau de pression acoustique par bandes de fréquences avec une durée minimum de mesure de 30 s pour les fréquences inférieures à 160 Hz. La mesure est effectuée à l'aide d'un sonomètre intégrateur.

□ Contraintes lors de la mesure

La mesure de l'environnement acoustique source à l'arrêt doit être réalisée afin de corriger éventuellement les niveaux relevés en fonction de la valeur du bruit de fond du site.

Les correctifs à appliquer sont donnés dans les normes NF EN ISO 3746 de mai 1996 pour la méthode de contrôle et NF EN ISO 3744 de novembre 1995 pour la méthode d'expertise.

□ Analyse des résultats

Le calcul de la puissance acoustique se fera selon les données des normes NF EN ISO 3746 de mai 1996 pour la méthode de contrôle et NF EN ISO 3744 de novembre 1995 pour la méthode d'expertise.

Le niveau de puissance acoustique est alors égal à :

$$L_w = \overline{L'_{pf}} + 10 \cdot \lg\left(\frac{S}{S_0}\right)$$

avec :

$\overline{L'_{pf}}$ = niveau de pression acoustique surfacique corrigé par le bruit de fond et les paramètres d'environnement (valeur par bandes de tiers d'octaves ou en niveau global pondéré A).

S = aire de la surface de mesurage.

$S_0 = 1$ m^2.

Dans l'application de la méthode d'expertise, l'incertitude de la mesure est inférieure ou égale à 1,5 dB(A), dans le cas de la méthode de contrôle, elle est de 3 ou 4 dB(A).

19.4 Exposition sonore quotidienne

■ Mesure du niveau d'exposition sonore quotidienne des travailleurs

□ Domaine d'application

La mesure permet d'évaluer les niveaux d'exposition sonore quotidienne des travailleurs au bruit et d'identifier les dépassements éventuels des seuils des niveaux de pression acoustique de crête. Cette mesure n'est pas directement liée au bruit des équipements de génie climatique mais à la position de l'opérateur dans le local où se trouvent les équipements et à la distance entre les équipements et l'opérateur. À l'extérieur, le niveau de pression acoustique reçu sera différent selon ces positions.

Le lecteur se rapprochera de la norme NF S 31-084 d'octobre 2002 pour réaliser les mesures conformément aux exigences de cette norme.

Dans le cas de mesures sur demande de l'inspection du travail, la personne ou l'organisme chargé des mesurages devra faire l'objet d'une accréditation auprès du COFRAC.

□ Moyens de mesurage

La mesure est réalisée à l'aide d'un sonomètre intégrateur pour la mesure des points fixes (postes de travail fixes) ou comme sonomètre porté pour les postes mobiles. L'exposimètre sera réservé aux mesures avec appareil porté pour des mesurages de longue durée.

Le paramètre mesuré par ces appareils sera le niveau de pression acoustique continu équivalent pondéré A et C ainsi que le niveau de pression acoustique de crête pondéré C.

□ Exigences réglementaires ou normatives

Les niveaux de pression acoustique continus équivalents pondérés A et C permettront de choisir la protection individuelle contre le bruit adaptée (casque ou bouchons d'oreilles). Les sites Internet des fabricants de ces protections auditives permettent leur choix en connaissant le niveau d'exposition sonore quotidienne pondéré A et le niveau d'exposition pondéré C ou les bandes d'octaves correspondantes.

Les seuils en terme de niveaux d'exposition quotidiens au bruit et de pression acoustique de crête sont fixés par des textes réglementaires (Directive Européenne 2003/10/CE, articles R 4431-2 à 4 du Code du Travail). Ils sont les suivantes :

– Valeurs limites d'exposition : $L_{EX,8h} = 87$ dB(A) ou $L_{pc} = 140$ dB.
– Valeurs d'exposition supérieures déclenchant l'action : $L_{EX,8h} = 85$ dB(A) ou $L_{pc} = 137$ dB.
– Valeurs d'exposition inférieures déclenchant l'action : $L_{EX,8h} = 80$ dB(A) ou $L_{pc} = 135$ dB.

■ Mode opératoire

□ Position du matériel

La position du microphone sera à 40 cm maximum de l'oreille de l'opérateur.

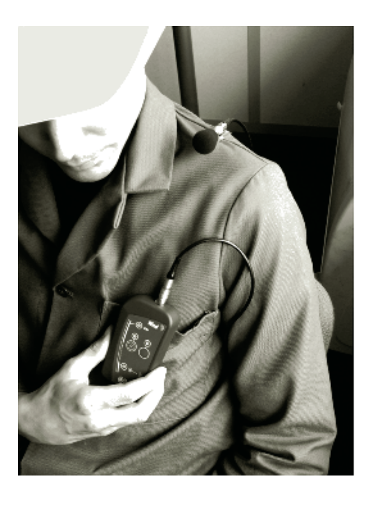


Figure 19.11 – Exposimètre WED007 porté par l'opérateur (Source 01dB-Metravib)

□ Paramètres mesurés

Le paramètre mesuré sera le niveau de pression acoustique continu équivalent pondéré A et C ainsi que le niveau de pression acoustique de crête pondéré C.

□ Contraintes lors de la mesure

Avant tout mesurage, le lecteur se rapprochera de la norme NF S 31-084 (méthode de mesurage des niveaux d'exposition au bruit en milieu de travail – octobre 2002).

L'analyse des postes de travail sera à effectuer pour appréhender les ambiances sonores de chaque travailleur et pour effectuer des groupes d'exposition homogènes (personnels soumis à des niveaux sonores similaires) en repérant bien les évènements acoustiques rares pour les prendre en compte lors de la mesure (soufflette à air comprimé en fin de journée…).

Ensuite, les personnes seront groupées dans des Groupes d'Exposition Homogènes (GEH : personnes travaillant dans la même ambiance sonore) et déterminer si le poste de travail est fixe ou mobile pour chaque GEH.

Il faut également déterminer si l'approche des mesures se fait par fonction ou par tâches. L'approche par tâche correspond à un travail qui peut être partagé selon

plusieurs séquences pouvant être communes à d'autres travailleurs. Dans les autres cas, l'approche sera par fonction, par exemple pour l'opérateur chargé de la maintenance qui sera mobile dans toute une zone.
La norme NF S 31-084 donne la durée de mesure minimale selon le nombre de personnes dans le GEH.
La mesure peut être réalisée en continu sur la journée de travail pour chaque travailleur (il s'agit alors d'un mesurage systématique), sinon la mesure sera effectuée par échantillonnage selon les exigences de la norme NF S 31-084 (durée et nombre d'échantillons).
À partir des GEH et de l'approche de mesure, les mesurages seront réalisés en mettant en œuvre les appareils de mesure prévus : des sonomètres pour les mesures à poste fixe et des exposimètres pour les mesures portées.
La mesure sera réalisée par échantillonnage (minimum 5). Chaque échantillon aura une durée identique, le niveau relevé sera le niveau de pression acoustique continu équivalent pondéré A, pondéré C et le niveau de pression acoustique de crête L_{pc}.
Un calcul d'incertitude sera réalisé selon les indications de la NF S 31-084. Cette incertitude est fonction de la classe de précision de l'appareil de mesure et de l'écart type sur les échantillons de mesure. Si l'incertitude est trop importante à l'issue des mesures, il faut soit augmenter le nombre d'échantillons soit revoir la composition du GEH.

□ Analyse des résultats

La valeur du niveau de pression acoustique de crête sera retenue comme la valeur maximale relevée sur l'ensemble des échantillons. Le nombre de dépassements aux limites fixées par les textes réglementaires sera également donné.
Les seuils en terme de niveaux d'exposition quotidiens au bruit et de pression acoustique de crête sont donnés au paragraphe « Exigences réglementaires ou normatives » du présent chapitre.
Le lecteur se rapprochera du décret 2006-892 et de l'arrêté du 19 juillet 2006 pour connaître les actions de prévention à mener selon les différents seuils.

20 • LES DIFFÉRENTS TYPES DE MESURES VIBRATOIRES

20.1 Mesure de la gêne vibratoire

■ Domaine d'application

Il s'agit de la mesure de vibrations générées par des équipements (chaudière, pompe de circulation, groupe frigorifique, etc.) qui sont susceptibles de gêner les tiers par les vibrations qu'ils émettent.

■ Moyens de mesurage

Pour effectuer ces mesurages, il faut mettre en œuvre un ou plusieurs accéléromètres adaptés (bande passante, sensibilité, etc. Voir paragraphe 18.3 relatif à l'accéléromètre). Ce ou ces accéléromètres seront reliés à une centrale d'analyse qui va transformer le signal électrique de l'accéléromètre en accélération vibratoire globale sur une bande de fréquence, de l'accélération par bandes de tiers d'octaves ou par fréquence sur une durée d'acquisition définie.
En pratique, l'opérateur prendra une base d'acquisition de 100 ou 200 ms et une analyse entre les tiers d'octaves 1 et 400 Hz.
L'accéléromètre utilisé peut réaliser les mesures sur un seul axe ou bien sur les 3 axes de référence (vertical, longitudinal et transversal). La mesure se fera selon ces trois axes si possible en simultané (mise en œuvre de 3 accéléromètres ou d'un accéléromètre triaxial).

■ Exigences réglementaires ou normatives

Il n'existe pas d'exigences réglementaires pour l'évaluation de la gêne liée à la transmission des vibrations.
Le lecteur s'appuiera sur les normes ISO 2631-1 de 1997 et ISO 2631-2 de 2003.
La norme ISO 2631-2 de 2003 permet de calculer un niveau global pondéré à partir de la mesure par bandes de tiers d'octaves entre 1 et 400 Hz selon les trois axes de référence. Cette valeur globale pondérée est alors comparée à des niveaux donnant une indication sur les effets des vibrations sur la santé dans la norme ISO 2631-1 de 1997 en fonction de la durée de l'exposition vibratoire.
Pour la sensation tactile des vibrations et donc la gêne potentielle dans les locaux, le lecteur s'appuiera plutôt sur les courbes issues de la norme ISO 2631-2 de 1989. Cette norme donne un réseau de courbes montrant le seuil de perception tactile

pour les tiers d'octaves compris entre 1 et 80 Hz. Le réseau de courbes donne ensuite des indications sur la gêne possible des occupants des locaux selon leur activité (habitation, bureau, hôpital, etc.) ou la période de jour ou de nuit.

Tableau 20.1 – Tableau donné dans l'ISO 2631-2 (Source ISO 2631-2 : 1989)

Lieu	Moment	Vibration continue ou intermittente[2)]	Excitation par vibrations d'impulsion se produisant plusieurs fois par jour
Zones critiques de travail (par exemple salles d'opération d'hôpital, laboratoires de précision, etc.)	Jour Nuit	1	1[3]
Résidence	Jour	2 à 4[4)]	30 à 90[4), 5), 6), 7)]
	Nuit	1,4	1,4 à 20
Bureau	Jour Nuit	4[8)]	60 à 128[8)]
Atelier[9)]	Jour Nuit	8[8), 10)]	90 à 128[8), 10)]

1) Le tableau 2 conduit à des amplitudes de vibrations au-dessous desquelles la probabilité de réaction est faible. (Tout bruit aérien engendré par la vibration des murs n'est pas considéré.)

2) Les vibrations quasi stationnaires, causées par des chocs répétitifs, sont également considérées. Le choc est défini dans l'ISO 2041 : 1975, chapitre 3, et est parfois rapporté à une vibration transitoire (impulsive).

3) Les amplitudes de vibrations transitoires dans des salles d'opérations d'hôpitaux et des zones critiques de travail se réfèrent aux périodes de travail où les opérations sont en cours, ou bien le travail critique est effectués. À d'autres moments, des amplitudes aussi élevées que celles des résidences peuvent être autorisées sous réserve qu'il y ait un accord en bonne forme et un avertissement.

4) Dans les zones résidentielles, il y a de grandes variations de la tolérance des vibrations. Les valeurs spécifiques dépendent des facteurs sociaux et culturels, des attitudes psychologiques et de l'ingérence prévue des vibrations dans la vie privée.

5) La « relation » entre le nombre d'événements par jour et leurs amplitudes n'est pas bien établie. La relation provisoire présentée ci-dessous doit être utilisée par des cas de plus de trois événements par jour en attendant de nouvelles recherches en matière de tolérance humaine aux vibrations. Elle implique la multiplication supplémentaire par un facteur numérique $F_n = 1{,}7\ N^{-0{,}5}$ où N est le nombre d'événements par jour. Cette « relation » ne s'applique pas quand il en résulte des valeurs inférieures à celles données par les facteurs pour les vibrations continues. Lorsque la gamme des amplitudes d'événements est petite (moins de la moitié de l'amplit!ude du plus grand événement), on peut utilsiser la moyenne arithmétique. Autrement, seule la plus grande amplitude nécessite d'être considérée.

6) Pour des événements discrets de durée excédant 1 s, les facteurs peuvent être réglés en les multipliant par un facteur de durée, F_d :

$F_d = T^{-1{,}22}$ pour des sols en béton et T compris entre 1 et 20

$F_d = T^{-0{,}32}$ pour des sols en bois et T compris entre 1 et 60

où T est la durée de l'événement en secondes, et qui peut être estimée à partir des points à 10 % (– 20 dB) sur les diagrammes temporels du mouvement.

7) Lors de l'excavation de rochers durs où des troubles souterrains causent des vibrations de très hautes fréquences, un facteur jusqu'à 128 a été jugé acceptable pour les propriétés résidentielles dans certains pays.

■ Mode opératoire

□ Position du matériel

Le ou les accéléromètres seront mis en place aux emplacements désignés par les plaignants, généralement au sol. Ils seront fixés rigidement à l'aide de colle, de plâtre, de cire ou par une fixation mécanique rigide.
Au centre d'une dalle, entre les poutres ou les poteaux de la structure, l'amplitude vibratoire sera maximale pour le premier mode propre de vibration de l'élément de dalle (les appuis restent fixes et le centre de la dalle se déforme selon l'axe vertical). L'opérateur choisira de préférence cette position pour réaliser les mesures de gêne vibratoire.

□ Paramètres mesurés

Le paramètre mesuré sera la moyenne de l'accélération vibratoire ou du niveau d'accélération vibratoire par bandes de tiers d'octaves entre 1 et 400 Hz. La durée d'acquisition sera fonction de la durée d'apparition des vibrations.
Dans le cas de vibrations permanentes lors du fonctionnement de l'équipement, une mesure de 5 à 10 min permettra de mettre en évidence les valeurs de l'accélération vibratoire. On choisira l'accélération vibratoire maximale sur une base d'acquisition de 1 seconde.
Dans le cas d'une apparition aléatoire de vibrations, il faudra réaliser les mesures sur une durée plus importante allant de quelques minutes à quelques heures voire plusieurs jours pour mettre en évidence le phénomène vibratoire. La mise en corrélation de ces vibrations avec le fonctionnement de l'appareil incriminé sera alors plus difficile. La valeur retenue sera l'accélération vibratoire maximale sur une base d'acquisition de 100 ms.

□ Contraintes lors de la mesure

Dans le cas d'un revêtement de sol souple (moquette, pvc, etc.) dans la pièce servant aux mesurages, l'opérateur cherchera à se fixer rigidement sur le support (dalle ou plancher). Le collage du capteur sur le revêtement de sol souple va engendrer un amortissement des vibrations aux fréquences élevées et la mesure ne sera pas fidèle au ressenti des vibrations par les personnes.
Lors des mesures, les vibrations résiduelles liées aux pas des personnes ou au fonctionnement d'autres équipements seront à exclure de l'analyse.

□ Analyse des résultats

Pour l'application de la norme ISO 2631-1 de 1997, la valeur de l'accélération efficace pour chaque bande de tiers d'octave entre 1 et 400 Hz sera calculée à l'aide de la formule suivante :

$$a_i = \sqrt{(a_{xwi})^2 + (a_{ywi})^2 + (a_{zwi})^2}$$

a_i = accélération combinée selon les trois axes.
a_{xwi} = accélération selon l'axe des x (longitudinal).
a_{ywi} = accélération selon l'axe des y (transversal).
a_{zwi} = accélération selon l'axe des z (vertical).
La valeur calculée pour chaque bande de tiers d'octave entre 1 et 400 Hz sera pondérée selon le réseau de pondération W_m issu de la norme ISO 2631-2 de 2003.

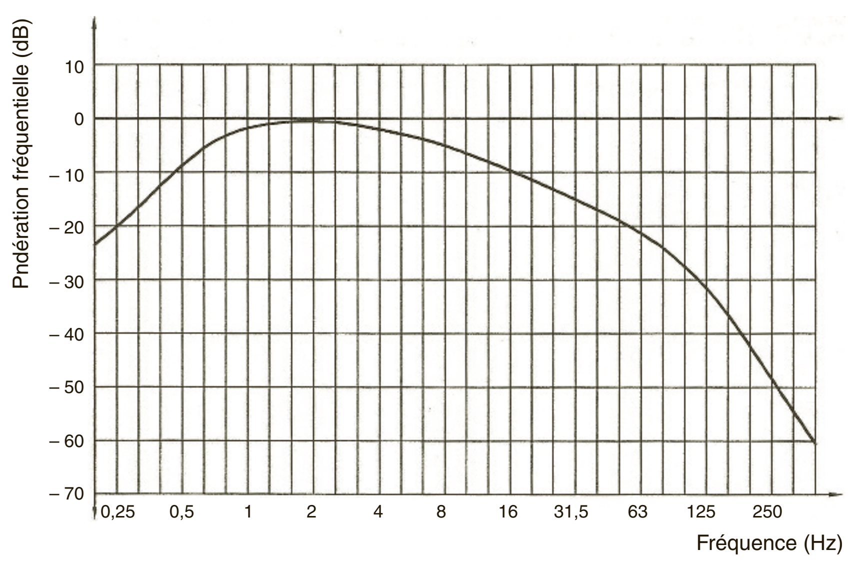


Figure 20.1 - Réseau de pondération en fréquence W_m donné dans l'ISO 2631-2 (Source ISO 2631-2 : 2003)

Ensuite, la valeur globale pondérée sera calculée selon la formule suivante :

$$a_W = \sqrt{\sum a_i \cdot W_{mi}}$$

Avec :
a_W = accélération globale pondérée.
W_{mi} = pondération fréquentielle pour la $i^{\text{ème}}$ bande de tiers d'octaves donnée dans le réseau de pondération de l'ISO 2631-2 de 2003.
a_i = valeur efficace de l'accélération combinée pour la $i^{\text{ème}}$ bande de tiers d'octaves.

La valeur a_W sera comparée aux exigences des zones de précaution de la santé indiquées sur la figure 20.2 selon la durée d'exposition. La valeur calculée doit être inférieure à la zone en pointillés.
Pour la perception tactile des vibrations et la potentialité de gêne vibratoire, les données seront combinées selon la formule suivante pour chaque bande de tiers d'octaves entre 1 et 80 Hz :

$$a = \sqrt{(1{,}4a_{xw})^2 + (1{,}4a_{yw})^2 + (a_{zw})^2}$$

Avec :
a = accélération combinée selon les trois axes.
a_{xw} = accélération selon l'axe des x (longitudinal).
a_{yw} = accélération selon l'axe des y (transversal).
a_{zw} = accélération selon l'axe des z (vertical).

Ces valeurs seront reportées sur les réseaux de courbes données dans la norme ISO 2631/2 de 1989 (figure 20.3). L'opérateur vérifiera si la courbe de référence correspondant à la destination du local est dépassée, dans ce cas, il y a alors potentialité de gêne.

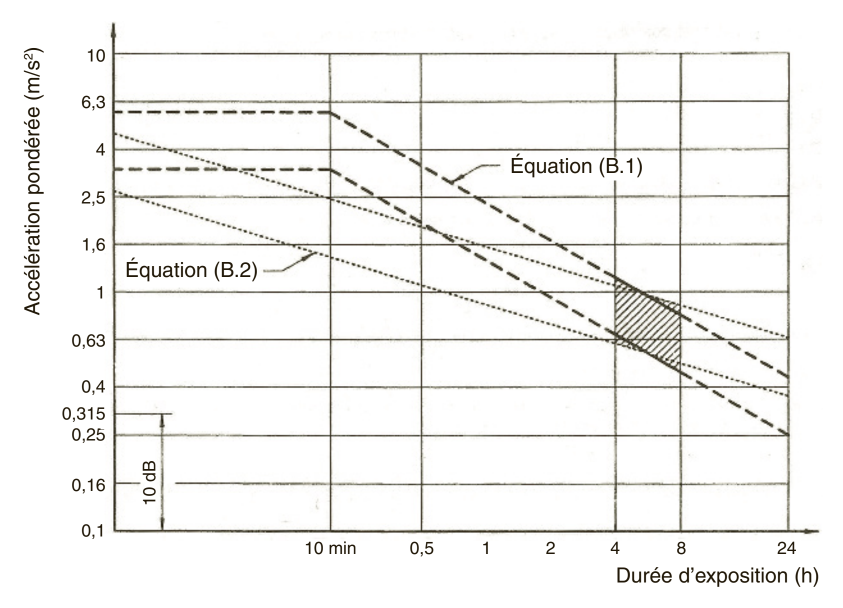


Figure 20.2 - Zones de précaution santé (Source ISO 2631-1 : 1997)

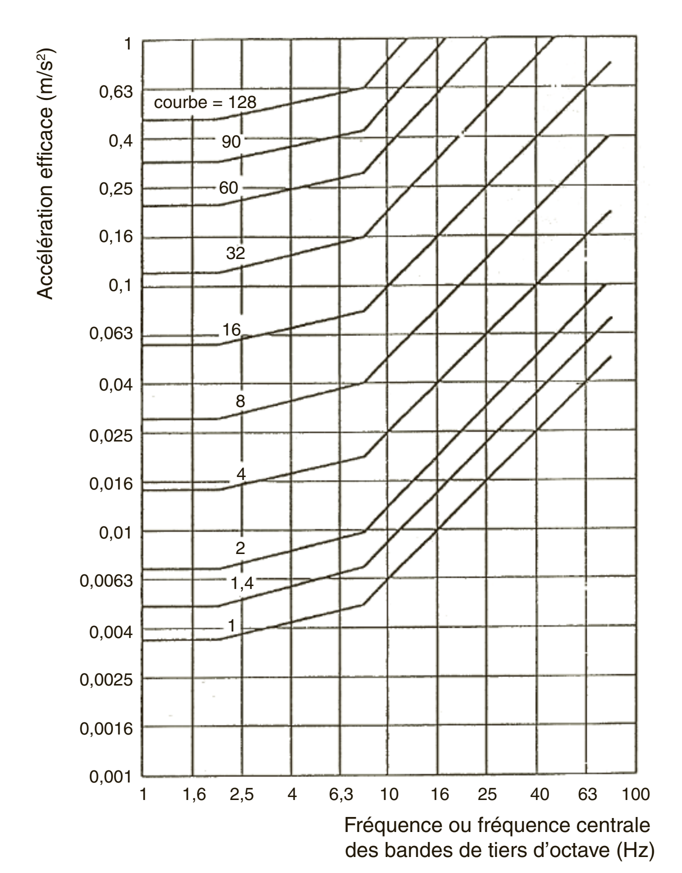


Figure 20.3 – Courbes de l'ISO 2631-2 donnant les limites de l'accélération vibratoire combinée selon la destination des locaux du tableau M-24 (Source NF EN ISO 2631/2 : 1989)

20.2 Mesure des contraintes vibratoires sur les bâtiments

■ Domaine d'application

Il s'agit de la mesure de vibrations générées par les équipements des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement qui sont susceptibles de mettre en péril les immeubles des tiers par les vibrations qu'ils émettent.

■ Moyens de mesurage

Pour effectuer ces mesurages, il faut mettre en œuvre un ou plusieurs accéléromètres adaptés (bande passante, sensibilité, etc., voir chapitre 18.3 relatif à l'accéléromètre). Ce ou ces accéléromètres seront reliés à un intégrateur et à une centrale d'analyse qui va transformer le signal électrique de l'accéléromètre en vitesse vibratoire globale sur une bande de fréquence ou de la vitesse par bandes de tiers d'octaves ou par fréquence sur une durée d'acquisition définie.
En pratique, l'opérateur prendra une base d'acquisition de 100 ou 200 ms et une analyse entre les tiers d'octaves 1 et 400 Hz.
L'accéléromètre utilisé peut réaliser les mesures sur un seul axe ou bien sur les 3 axes de référence (x vertical, y longitudinal et z transversal). La mesure se fera selon ces trois axes si possible en simultané (mise en œuvre de 3 accéléromètres ou un accéléromètre triaxial). L'opérateur peut également utiliser des capteurs de vitesse vibratoire.

■ Exigences réglementaires ou normatives

Les exigences réglementaires sont données dans les règles techniques annexées à la circulaire 86-23 du 23 juillet 1986 relative aux vibrations mécaniques émises dans l'environnement par les ICPE.
Cette circulaire donne des niveaux de vitesse vibratoire à ne pas dépasser en fonction de la solidité de la structure du bâtiment mesuré et du type de vibrations rencontrées (voir figures 20.4 et 20.5).

■ Mode opératoire

□ Position du matériel

Le ou les accéléromètres seront mis en place aux emplacements les plus proches des éléments de structure ou des fondations de l'immeuble. Ils seront fixés rigidement à l'aide de colle, de plâtre, de cire ou par une fixation mécanique rigide.

□ Paramètres mesurés

Le paramètre mesuré sera la moyenne de la vitesse vibratoire en mm/s ou par bandes de fréquences entre 4 et 100 Hz pour chaque axe de mesure (x, y et z). La durée d'acquisition sera fonction de la durée d'apparition des vibrations.
Dans le cas de vibrations permanentes lors du fonctionnement de l'équipement, une mesure de 5 à 10 min permettra de mettre en évidence les valeurs de la vitesse vibratoire. On choisira la vitesse vibratoire maximale sur une base d'acquisition de 1 seconde.

TABLEAU 1

VIBRATIONS CONTINUES OU ASSIMILÉES

Valeurs limites de la vitesse particulaire en fonction de la fréquence observée

Méthode de mesure de classe « Contrôle »

Ces valeurs limites sont valables pour chacune des trois composantes du mouvement

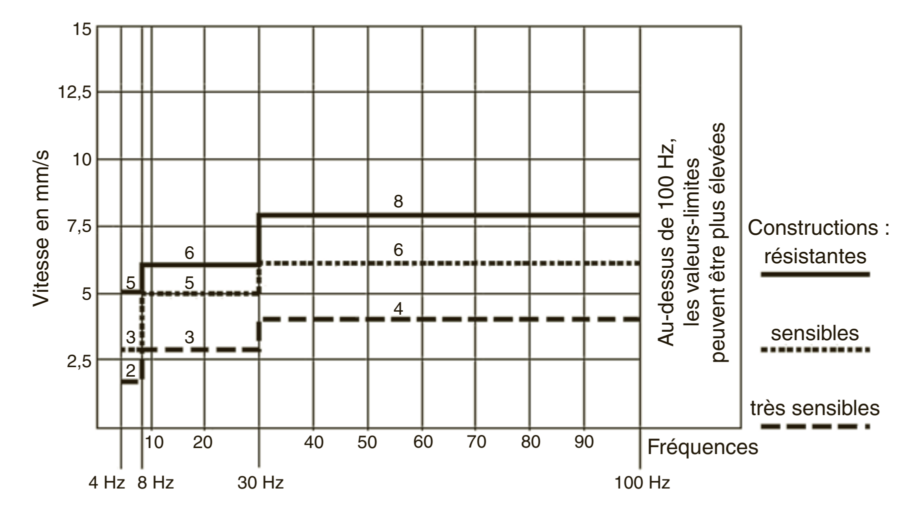


Figure 20.4 – Valeur limite de la vitesse particulaire en fonction de la fréquence pour des vibrations continues (source circulaire 86-23 du 23 juillet 1986)

TABLEAU 2

VIBRATIONS IMPULSIONNELLES À IMPULSIONS RÉPÉTÉES

Valeurs limites de la vitesse particulaire en fonction de la fréquence observée

Méthode de mesure de classe « Contrôle »

Ces valeurs limites sont valables pour chacune des trois composantes du mouvement

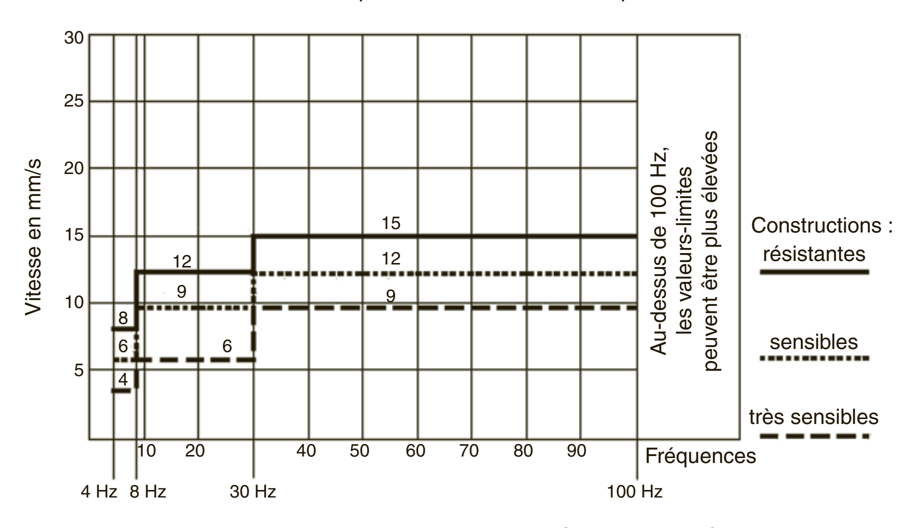


Figure 20.5 - Valeur limite de la vitesse particulaire en fonction de la fréquence pour des vibrations impulsionnelles à impulsions répétées (source circulaire 86-23 du 23 juillet 1986)

Dans le cas d'une apparition aléatoire de vibrations, il faudra réaliser les mesures sur une durée plus importante allant de quelques minutes à quelques heures voire plusieurs jours pour mettre en évidence le phénomène vibratoire. La mise en corrélation de ces vibrations avec le fonctionnement de l'appareil incriminé sera alors plus difficile. La valeur retenue sera alors l'accélération vibratoire maximale sur une base d'acquisition de 100 ms.

□ Contraintes lors de la mesure

Dans le cas d'un revêtement de sol souple (moquette, pvc, etc.) dans le local servant aux mesurages, l'opérateur cherchera à se fixer rigidement sur le support (dalle ou plancher). Le collage du capteur sur le revêtement de sol souple va engendrer un amortissement des vibrations aux fréquences élevées et la mesure ne sera pas fidèle aux vibrations transmises à la structure.
Les seuils de vitesse vibratoire donnés dans la circulaire 86-23 sont largement plus élevés que les niveaux donnés comme limite pour la gêne vibratoire. Les vibrations résiduelles comme les pas ou le fonctionnement de petits équipements n'engendreront vraisemblablement pas de perturbations pour les mesures. Il faudra tout de même s'assurer que les vibrations mesurées proviennent bien des équipements de l'ICPE.

□ Analyse des résultats

Il faut tout d'abord déterminer le style de construction de l'immeuble visé par les mesures (constructions résistantes, sensibles ou très sensibles) selon les indications des Règles Techniques.
Les données par bandes de fréquences en mm/s pour chaque axe de mesure seront reportées et comparées aux réseaux de courbes données dans les règles techniques annexées à la circulaire du 23 juillet 1986 (voir paragraphe « Exigences réglementaires ou normatives » du présent chapitre). Si la courbe correspondante au type de bâtiment est dépassée il y a alors un risque pour la tenue du bâtiment.

21 • ANNEXES

Rappels d'acoustique

■ Puissance acoustique

Un appareil qui émet du bruit dans l'air lui transfère une puissance mécanique appelée puissance acoustique. Cette puissance est exprimée en watt. Elle est très faible. Une puissance acoustique de 10^{-10} watt peut provoquer un niveau de pression acoustique audible. La puissance acoustique d'une source est indépendante de son milieu de propagation.

On peut faire une analogie avec le chauffage électrique. Dans ce cas, la puissance électrique d'un radiateur délivre de la chaleur que l'on mesure avec un thermomètre. Selon la position du thermomètre, la puissance du radiateur et le volume de la pièce, la température varie. En acoustique, le principe est similaire, la source caractérisée par sa puissance acoustique (*cf.* radiateur) va délivrer une pression acoustique dans un local (cf. température)

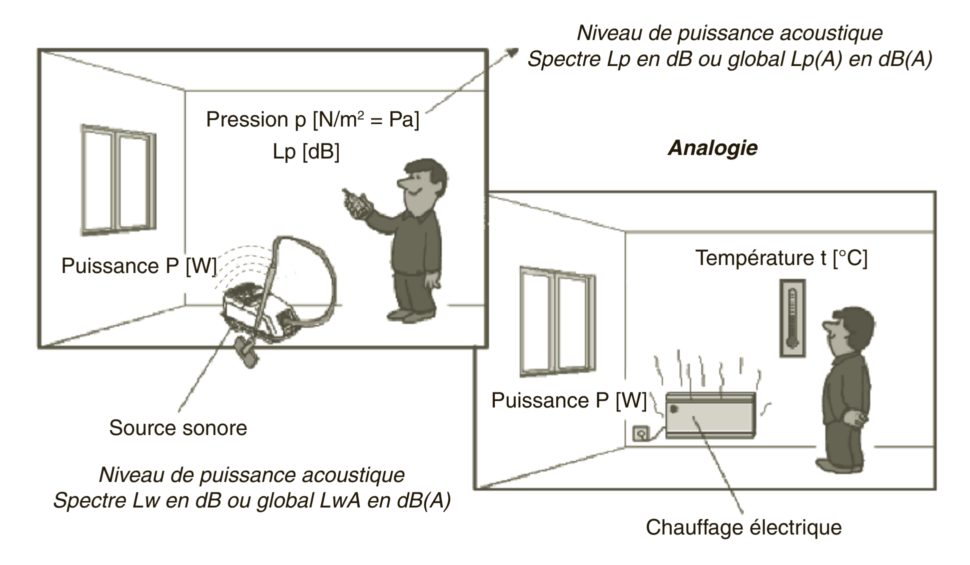


Figure 21.1 – Analogie thermique acoustique

Niveau de puissance acoustique

Le niveau de puissance acoustique L_w d'une source est exprimé en dB pour le spectre ou en dB(A) pour le niveau global pondéré A. Il est égal à 10 fois le logarithme base 10 du rapport entre la puissance acoustique et la puissance acoustique de référence :

$$L_w = 10 \cdot \lg\left[\frac{p_{\text{acoustique}}}{p_{\text{révérence}}}\right]$$

avec :

$p_{\text{acoustique}}$ = puissance acoustique de la source en watt.
$p_{\text{référence}} = 10^{-12}$ W.

Le niveau de puissance acoustique des appareils est fourni par l'industriel fabricant à partir de mesures de pression acoustique en laboratoire ou sur site.

Directivité

C'est la courbe de réponse en niveau de pression acoustique pour différents angles autour de la source. Elle est tracée pour une fréquence donnée dans un plan, le plus souvent horizontal et vertical, en coordonnées polaires et dont la source occupe le centre.

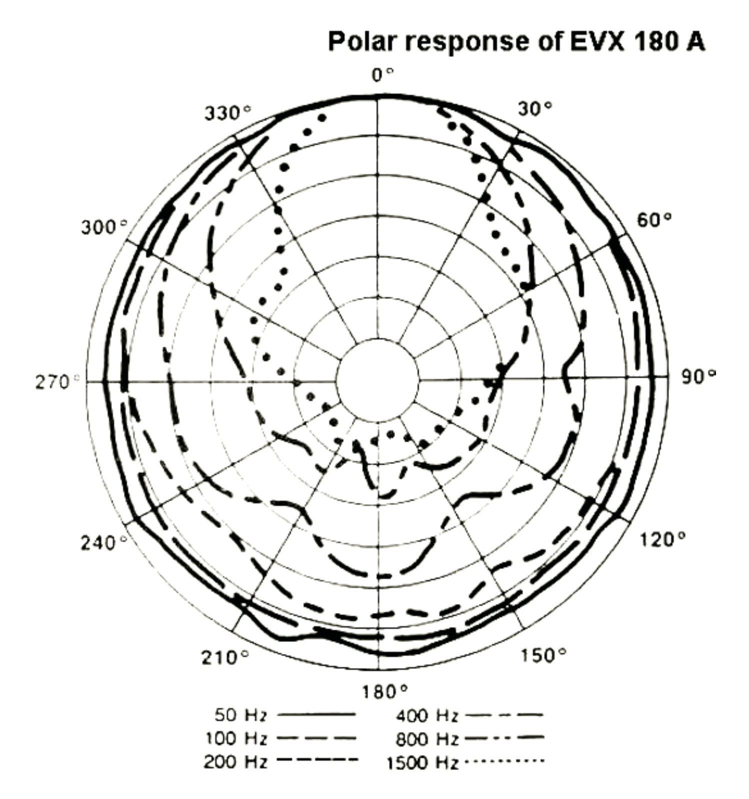


Figure 21.2 – Courbe de directivité horizontale d'un haut-parleur (Source Electro Voice)

G

LES MESURES ACOUSTIQUES ET VIBRATOIRES

Pression acoustique

Le microphone d'une chaîne de mesure ou le tympan de l'oreille sont sensibles aux variations de pression autour de la pression atmosphérique (la pression atmosphérique peut être considérée comme stable sur un intervalle d'observation relativement court). Cette pression est appelée pression acoustique, elle s'exprime en pascals. Elle est généralement comprise entre 20 µPa et 20 Pa. Au-delà de 20 Pa, elle peut entraîner des lésions immédiates et irréversibles de l'oreille humaine.

Niveau de pression acoustique

Le niveau de pression acoustique L_p correspond à dix fois le logarithme base dix du rapport entre le carré de la pression acoustique efficace et le carré de la pression acoustique de référence. Il est égal à :

$$L_p = 10 \cdot \lg\left[\frac{p^2}{p_0^2}\right]$$

avec :
p = pression acoustique efficace en pascals.
p_0 = pression acoustique de référence égale à 20 µPa.

Le niveau de pression acoustique est basé sur la sensation auditive humaine qui est caractérisée par une sensibilité particulière aux variations de pression. Une pression acoustique efficace doublée n'induit pas un ressenti du niveau de pression acoustique deux fois plus important.
Le niveau de pression acoustique est affiché en décibel sur l'appareil de mesure soit en niveau global pondéré A, soit en niveau global pondéré C ou non pondéré, soit par bandes de fréquence.
Le seuil d'audibilité est de zéro décibel et le seuil de la douleur est de 120 dB.
Comme le niveau de pression acoustique est issu d'un rapport entre deux valeurs, on peut mesurer des niveaux de pression acoustique négatifs (à condition d'avoir un micro adapté et d'être dans une chambre anéchoïque (sol, plafond et murs absorbants) en l'absence de source de bruit à proximité).

Spectre

Le spectre acoustique correspond à l'ensemble des valeurs du niveau de pression acoustique ou du niveau de puissance acoustique réparties sur l'ensemble des bandes de fréquences étudiées. Les valeurs sont exprimées en dB non pondérés. La représentation se fait sur un graphique avec en abscisse les bandes de fréquences et en ordonnées les niveaux acoustiques.

Pondérations fréquentielles

Il existe trois courbes de pondération fréquentielle, les courbes A, C et Z données dans la norme NF EN 61672-1 de juin 2003. La courbe de pondération A est la plus utilisée, elle permet de corriger les valeurs du spectre sonore pour tenir compte de la sensibilité de l'oreille humaine. L'oreille humaine est plus sensible aux hautes fréquences qu'aux basses fréquences. L'atténuation due à la pondération A

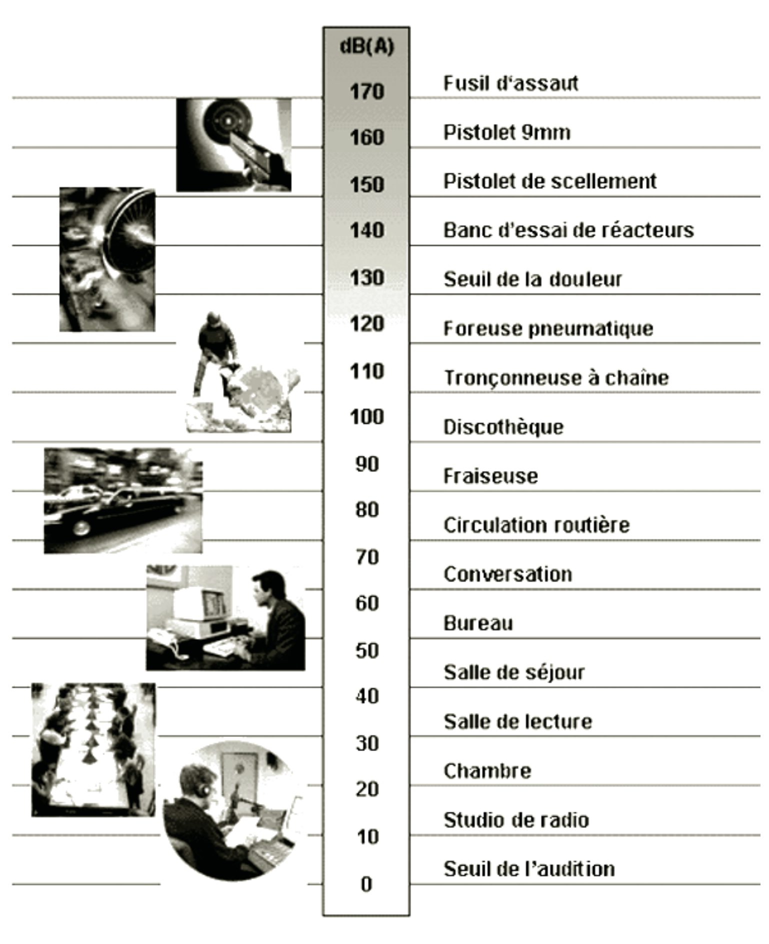


Figure 21.3 – Échelle des bruits

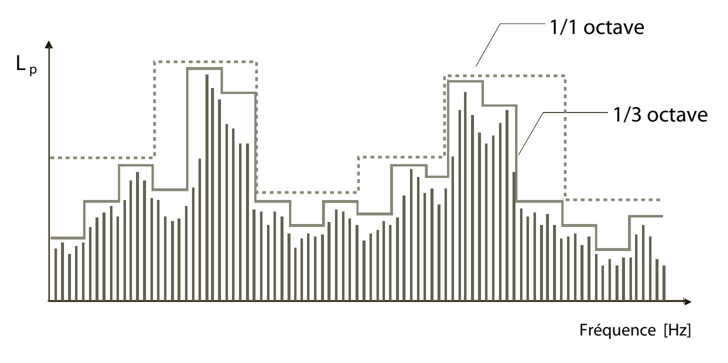


Figure 21.4 - Spectres acoustiques en fréquence, en octave et tiers d'octaves

est donc importante en basses fréquences et faible en hautes fréquences. Le niveau sonore pondéré A est une valeur globale égale à la somme énergétique des niveaux sonores pondérés pour chaque bande de fréquence. La valeur est exprimée en dB(A).

Les sonomètres possèdent des filtres de pondération pour permettre la lecture directe du niveau de pression acoustique global pondéré.
La courbe de pondération C est utilisée pour les niveaux sonores élevés. Contrairement à la courbe de pondération A, elle a des atténuations faibles entre 30 Hz et 10 000 Hz. Le poids de chaque bande de fréquence entre 100 et 4000 Hz est le même.
La courbe Z a une pondération égale à 0 pour les fréquences comprises entre 10 et 20 000 Hz.

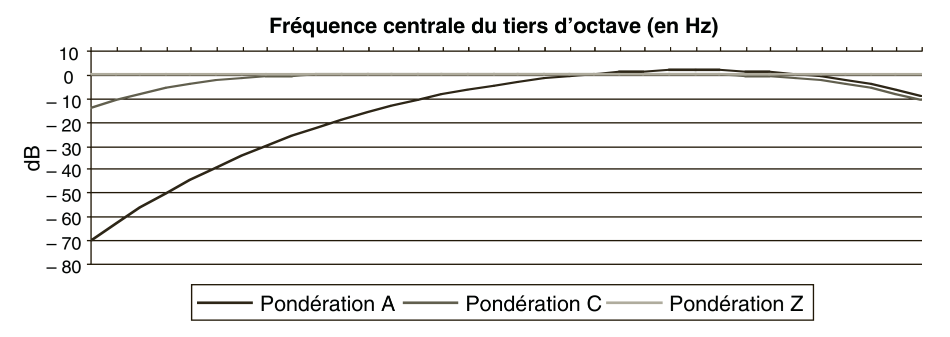


Figure 21.5 - Courbes de pondération A, C et Z (Source NF EN 61672-1 : 2003)

Niveau de pression acoustique continu équivalent

C'est la valeur du niveau de pression acoustique d'un son continu stable qui, au cours d'une période spécifiée T, a la même pression acoustique quadratique moyenne d'un son considéré dont le niveau varie en fonction du temps. Il est égal à :

$$L_{eq,\,T} = 10 \cdot \lg\left[\frac{1}{t_2 - t_1}\int_{t_1}^{t_2}\frac{p(t)^2}{p_0^2}dt\right]$$

avec :
$T = t_2 - t_1$ intervalle de temps de la mesure.
$p(t)$ = pression acoustique en fonction du temps.
p_0 = pression acoustique de référence égale à 20 µPa.

Le niveau de pression acoustique continu équivalent pondéré en fréquence selon la pondération A est égal à :

$$L_{Aeq,\,T} = 10 \cdot \lg\left[\frac{1}{t_2 - t_1}\int_{t_1}^{t_2}\frac{p(t)_A^2}{p_0^2}dt\right]$$

Niveau de pression acoustique de crête

Selon la norme NF S 31-084 de 2002, le niveau de pression acoustique de crête L_{pc} correspond à dix fois le logarithme base dix du carré du rapport entre la pression acoustique de crête et la pression acoustique de référence. Il est donné en décibel pondéré C par la formule :

$$L_{Pc} = 10 \cdot \lg\left[\frac{p_c}{p_0}\right]^2$$

Niveau normalisé

On appelle niveau normalisé le niveau de pression acoustique mesuré dans un local et corrigé par rapport à une durée de réverbération de référence. La durée de réverbération est le temps que met le son à décroître de 60 dB. La durée de réverbération est différente pour chaque bande d'octave.
En effet, si l'on est dans un local vide avec des parois réfléchissantes, le niveau de pression acoustique sera plus important que dans un local meublé avec des absorbants sur les parois.
Pour tenir compte de cet écart, une durée de réverbération de référence est donnée dans les exigences des niveaux sonores mesurés à l'intérieur des locaux. En général elle est de 0,5 s en niveau global ou pour chaque bande de fréquence mais elle peut être différente selon les exigences réglementaires ou fixées par la maîtrise d'ouvrage.
La formule de correction est la suivante :

$$L_{nT} = L - 10 \cdot \lg\left(\frac{T}{T_0}\right)$$

L_{nT} = niveau normalisé.
L = niveau mesuré.
T = durée de réverbération mesurée.
T_0 = durée de réverbération de référence.

Pour le niveau global pondéré A, la durée de réverbération à retenir est égale à la moyenne arithmétique des durées de réverbération des octaves 250 et 500 Hz (selon la norme NF S 31-057 de 1982 relative à la vérification de la qualité acoustique des bâtiments d'habitation).

Analyse statistique – Indices fractiles

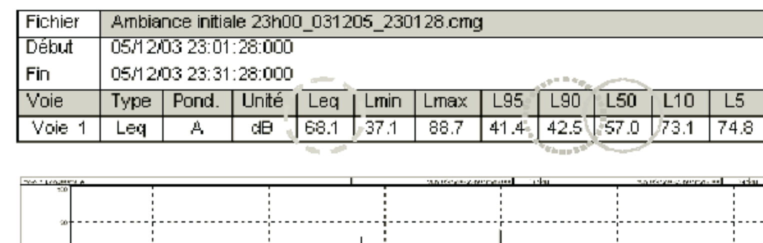
Par l'analyse statistique du L_{Aeq}, on peut déterminer le niveau de pression acoustique qui est dépassé pendant n% de l'intervalle de temps considéré, dénommé « niveau acoustique fractile ». Son symbole est $L_{N,\tau}$. Lorsque la mesure est effectuée avec la pondération A, son symbole est $L_{AN,\tau}$. Par exemple, $L_{A95,1s}$ est le niveau de pression acoustique pondéré A dépassé durant 95 % de l'intervalle de mesurage sur une base d'intégration égale à 1 s. Le $L_{90,\tau}$ ou $L_{95,\tau}$ correspondent au bruit de fond, le $L_{5,\tau}$ ou le $L_{10,\tau}$ correspondent aux bruits les plus importants.
Cette analyse statistique peut également s'effectuer sur les bandes d'octaves ou de tiers d'octaves (Figure 21.6).

Constantes d'intégration temporelles

Il existe plusieurs constantes d'intégration lorsque l'on utilise un sonomètre. La pression acoustique efficace est obtenue en utilisant une pondération fréquentielle normalisée et une pondération temporelle normalisée.
Il existe différents temps d'intégration dont les valeurs sont normalisées. Ils sont donnés dans la norme NF EN 61672-1 de juin 2003. Nous pouvons noter :

– I pour *Impulse* (Impulsion) dont la constante d'intégration est de 35 ms.

– F pour *Fast* (Rapide) dont la constante d'intégration est de 125 ms.
– S pour *Slow* (Lent) dont la constante d'intégration est de 1 s.



Fichier	Ambiance initiale 23h00_031205_230128.cmg										
Début	05/12/03 23:01:28:000										
Fin	05/12/03 23:31:28:000										
Voie	Type	Pond.	Unité	Leq	Lmin	Lmax	L95	L90	L50	L10	L5
Voie 1	Leq	A	dB	68.1	37.1	88.7	41.4	42.5	57.0	73.1	74.8

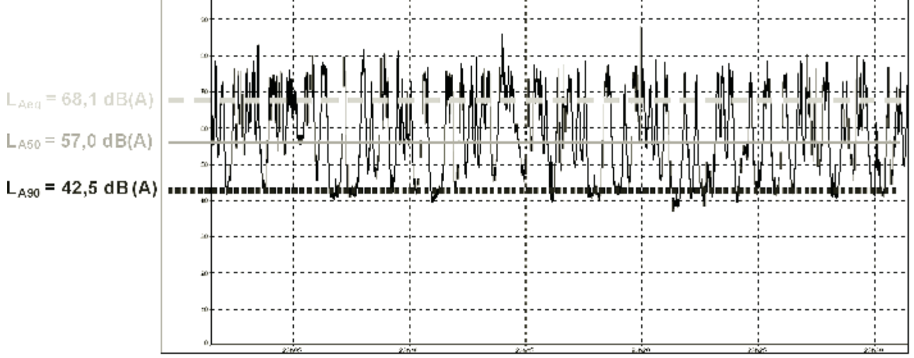


Figure 21.6 – Répartition des indices fractiles sur la courbe de mesure (source SOCOTEC)

■ Somme de niveaux

L'utilisation du décibel comme unité du niveau de pression ou du niveau de puissance acoustique modifie les règles habituelles de calcul. Mathématiquement, l'addition de deux bruits L_{p1} et L_{p2} s'effectue comme suit :

$$L_{p1+2} = 10 \cdot \lg\left(10^{\frac{L_{p1}}{10}} + 10^{\frac{L_{p2}}{10}}\right)$$

Une règle simple permet d'additionner deux niveaux entre eux, pour deux bruits voisins (écart inférieur ou égal à 10 dB), on calcule la différence en décibel entre les deux niveaux et on rajoute arithmétiquement au niveau le plus élevé la valeur correspondante (en dB) du tableau ou de la courbe qui suivent :

Différence en dB entre les deux niveaux sonores										
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Valeur en dB à rajouter au niveau le plus élevé										
3	2,6	2,1	1,8	1,5	1,2	1	0,8	0,6	0,5	0,4

Si les deux niveaux ont une différence supérieure à 10 dB, on retiendra la valeur du niveau le plus fort.

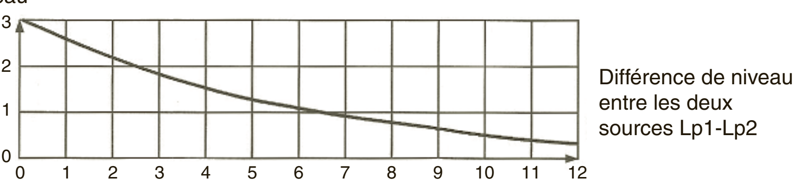


Figure 21.7 – Niveau à ajouter pour la somme de deux niveaux sonores

Si plusieurs niveaux sont à ajouter, on peut les ajouter deux à deux puis ajouter leurs sommes, etc.
Cette formule est valable pour l'addition de niveaux de pression acoustique. Par exemple. Elle permet de calculer un niveau de pression acoustique ambiant quand nous connaissons la valeur théorique du bruit particulier qui se rajoute à un bruit résiduel.
Dans le cas de la somme de niveaux de pression acoustique continus équivalents, le facteur de durée est à prendre en compte, dans ce cas, c'est la formule suivante qu'il faut appliquer :

$$L_{eq,T1+T2} = 10 \cdot \lg\left(\frac{T1 \cdot 10^{\frac{L_{eq,T1}}{10}} + T2 \cdot 10^{\frac{L_{eq,T2}}{10}}}{T1 + T2}\right)$$

Exemple : un niveau de pression acoustique continu équivalent de 90 dB durant 1 h cumulé à un niveau de pression acoustique continu équivalent de 60 dB durant 7 h donne un niveau de pression acoustique continu équivalent de 81 dB sur 8 h.

■ Bruit ambiant

Bruit total existant dans une situation donnée, à un emplacement donné, pendant un intervalle donné. Il est composé des bruits émis par toutes les sources proches ou éloignées.
Le bruit ambiant doit être associé à une référence de date et d'heure, les niveaux sonores des sources pouvant évoluer dans le temps.

■ Bruit particulier

C'est une composante du bruit ambiant qui fait objet de la mesure, qui peut être identifiée spécifiquement et que l'on désire distinguer du bruit ambiant.

■ Bruit résiduel

Bruit ambiant en l'absence du bruit particulier objet de la mesure.

■ Émergence

C'est la différence arithmétique entre le bruit ambiant et le bruit résiduel. Elle provient de la modification temporelle du bruit ambiant induite par l'apparition du bruit particulier.



■ Courbes NR, NC

Ce sont des courbes d'évaluation permettant d'estimer la nuisance d'un bruit à partir des valeurs du niveau de pression acoustique mesurées par bandes d'octaves. Les courbes sont établies selon la sensibilité de l'oreille humaine.

Les courbes NR d'estimation du bruit (*noise rating*) sont issues de la norme NF S 30-010 de décembre 1974. Elles sont utilisées en France. Les courbes vont de NR0 à NR130. Elles permettent d'analyser un spectre entre 31,5 et 8 000 Hz.

Les courbes NC de critère de niveau de bruit (*noise criteria*) sont issues des travaux de Léo BERANEK, acousticien américain, en 1957. Elles sont principalement utilisées en Amérique du Nord. Les courbes vont de NC-15 à NC-65. Elles permettent d'analyser un spectre entre 63 et 8 000 Hz.

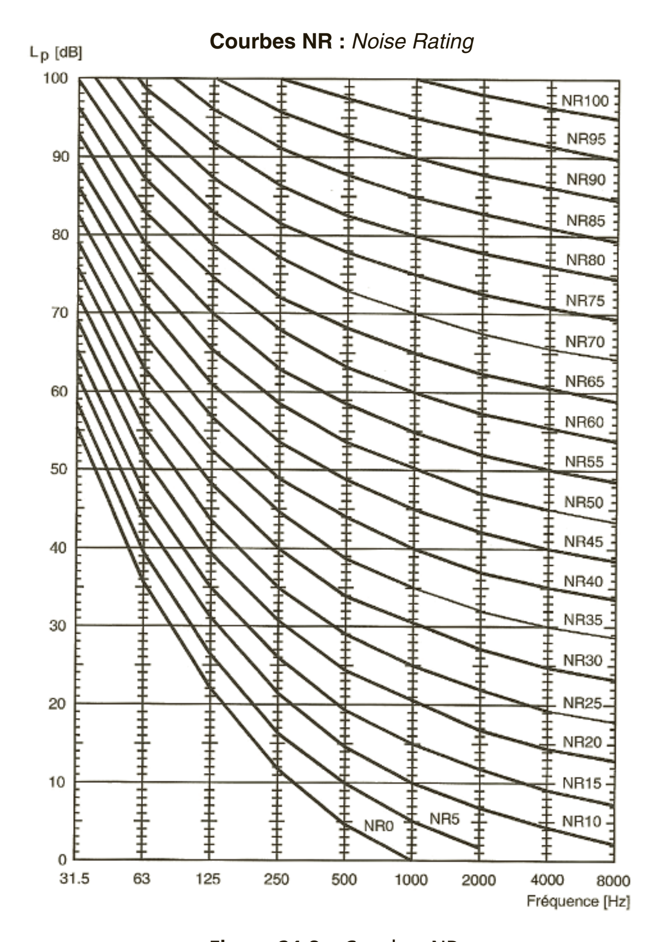


Figure 21.8 – Courbes NR
(source NF S 30-010 : 1974)

Courbes NC : *Noise Criteria*

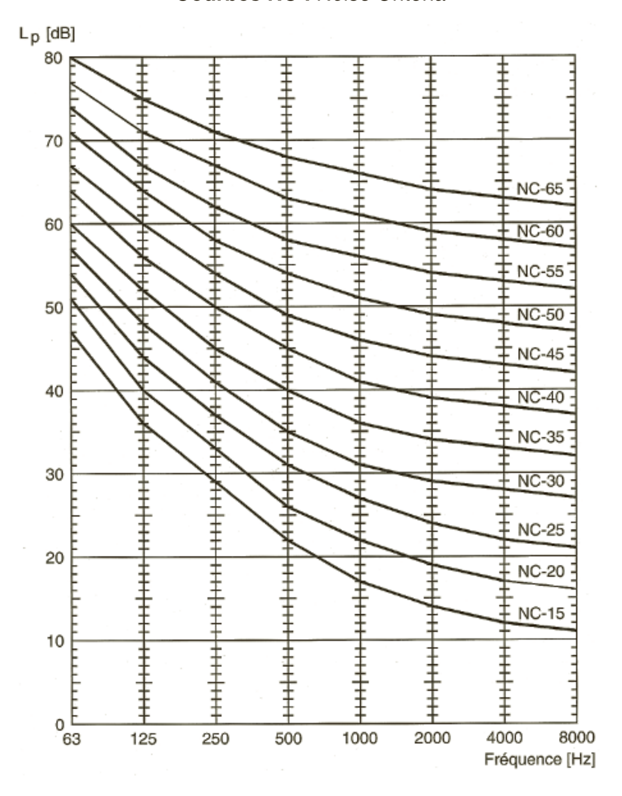


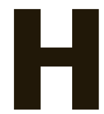
Figure 21.9 – Courbes NC
(source BERANEK)

■ Conclusion

Dans le domaine de l'acoustique et des vibrations, l'unité utilisée est le décibel (dB). Il faut donc connaître la variable mesurée car le dB peut correspondre à un niveau de pression acoustique, un niveau de puissance acoustique, un niveau d'accélération vibratoire…

Pratiquement, le tableau page suivante donne les indications sur les symboles utilisés, les variables et les unités correspondantes :

Symbole	Unité	Variable mesurée	Commentaires
L_p	dB	Niveau de pression acoustique instantané	Valeur par bandes de fréquence ou pour une fréquence particulière
L_{pA}	dB(A)	Niveau de pression acoustique instantané global pondéré A	Valeur globale pour un spectre pondéré A
$L_{eq,T}$	dB	Niveau de pression acoustique continu équivalent	Valeur par bandes de fréquence ou pour une fréquence particulière
$L_{Aeq,T}$	dB(A)	Niveau de pression acoustique continu équivalent pondéré A	Valeur globale pour un spectre pondéré A
$L_{Ceq,T}$	dB(C)	Niveau de pression acoustique continu équivalent pondéré C	Valeur globale pour un spectre pondéré C
L_{AS}	dB(A)	Niveau de pression acoustique efficace pondéré A mesuré avec la constante *SLOW*	Valeur globale pour un spectre pondéré A
L_{AF}	dB(A)	Niveau de pression acoustique efficace pondéré A mesuré avec la constante *FAST*	Valeur globale pour un spectre pondéré A
L_{AI}	dB(A)	Niveau de pression acoustique efficace pondéré A mesuré avec la constante *IMPULSE*	Valeur globale pour un spectre pondéré A
L_w	dB	Niveau de puissance acoustique	Valeur par bandes de fréquence ou pour une fréquence particulière
L_{wA}	dB(A)	Niveau de puissance acoustique pondéré A	Valeur globale pour un spectre pondéré A
L_{nT}	dB	Niveau de pression acoustique normalisé	Valeur par bandes de fréquence corrigée par la durée de réverbération
L_{nAT}	dB(A)	Niveau de pression acoustique normalisé pondéré A	Valeur globale pour un spectre pondéré A corrigée par la durée de réverbération
$L_{EX,d}$	dB(A)	Niveau d'exposition sonore quotidienne	Valeur globale pour un spectre pondéré A calculé pour une durée d'exposition définie
L_{pC}	dB(C)	Niveau de pression acoustique de crête	Valeur maximale de la pression acoustique de crête pondérée C pour une durée définie
L_a	dB	Niveau d'accélération vibratoire	Valeur par bandes de fréquence, pour une fréquence particulière ou valeur globale pour un spectre non pondéré
L_v	dB	Niveau de vitesse vibratoire	Valeur par bandes de fréquence, pour une fréquence particulière ou valeur globale pour un spectre non pondéré



Rappels de métrologie

22 • LES INCERTITUDES DE MESURES

22.1 Introduction

Lorsque l'on doit rendre compte du résultat d'un mesurage d'une grandeur physique, il faut obligatoirement donner une indication quantitative sur la qualité du résultat pour que ceux qui l'utiliseront puissent estimer sa fiabilité. En l'absence d'une telle indication, les résultats de mesurages ne peuvent pas être comparés soit entre eux, soit par rapport à des valeurs de référence données dans une spécification ou une norme.

Que ce soit lors d'un mesurage ponctuel ou lors d'un audit énergétique ou, plus globalement, lors de la recherche des performances énergétiques d'une installation de génie climatique, toutes les grandeurs mesurées ne reflètent pas la valeur exacte du mesurande.

En effet, en raison de la qualité intrinsèque de l'appareil de mesure, de sa mise en place, des compétences du manipulateur, etc., le mesurage ne représente qu'une valeur approchée du mesurande.

Pour se rendre compte de la difficulté pour connaître la valeur vraie d'une grandeur, il convient de rappeler la définition des grandeurs couramment utilisées dans notre vie quotidienne :

- Le **mètre** a été défini légalement en 1970 comme le dix-millionième partie du quart du méridien terrestre.
  - Depuis le 1er janvier 1961, la définition du mètre est la suivante : « Le mètre est la longueur égale à 1 650 763,73 longueurs d'onde dans le vide de la radiation correspondant à la transition entre les niveaux 2_{p10} et 5_{d5} de l'atome de krypton 86. »
  - Par équivalence avec la vitesse de la lumière, on peut aussi lire parfois que « le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant 1/299 792 458 seconde ».
  - Plus simplement, le mètre international en platine iridié est actuellement conservé au pavillon de Breteuil, à Saint-Cloud (92).
- Le **gramme** est le poids d'1 cm^3 d'eau à 4 °C.
- La **seconde** est définie comme « La durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133. »

H

RAPPELS DE MÉTROLOGIE

Nous n'aborderons pas ici le calcul d'incertitude objet de la norme NF ISO 5725 car celle-ci concerne les méthodes d'essais interlaboratoires permettant de déterminer l'exactitude des résultats et des méthodes de mesures selon des protocoles qui ne concernent pas les « mesurages de terrain » effectués sur les installations de génie climatique.

22.2 Quelle méthode choisir ?

Pour estimer l'incertitude de mesure qui entache un résultat, nous disposons de deux méthodes distinctes ; la méthode dite « GUM » et la méthode dite « 5725 ».

22.2.1 La méthode « GUM »

La méthode issue de la norme NF ENV 13005, communément appelée méthode GUM (Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure), est notamment basée sur la modélisation mathématique du processus. On composera l'incertitude sur la grandeur de sortie (l'incertitude de mesure) à partir des incertitudes sur les grandeurs d'entrée (les sources d'erreurs).
La démarche est la suivante :

– détermination du modèle mathématique ;
– identification et réduction des sources d'erreur ;
– estimation des incertitudes-types ;
– calcul de l'incertitude-type composée ;
– détermination de l'incertitude élargie.

C'est la méthode de référence pour les calculs d'incertitude dans le domaine du génie climatique.

22.2.1 La méthode « 5725 »

La méthode 5725 est définie dans la norme NF ISO 5725 qui est issue du monde des essais interlaboratoires. Elle est fondée sur les comparaisons d'essais expérimentaux entre laboratoires.
Par nature, ce n'est pas la méthode la mieux adaptée pour les mesurages de terrain que nécessitent les installations de génie climatique.
C'est pour cela que la suite de cette partie ne traitera que de la méthode « GUM » et des définitions fondamentales qui s'y rattachent.

22.3 Définitions fondamentales

Le vocabulaire utilisé dans les définitions ci-après est celui décrit dans la norme NF X 07-020 d'août 1999.

22.3.1 Incertitude de mesure

Paramètre, associé au résultat d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurande.

L'incertitude du résultat d'un mesurage reflète l'impossibilité de connaître exactement la valeur du mesurande.

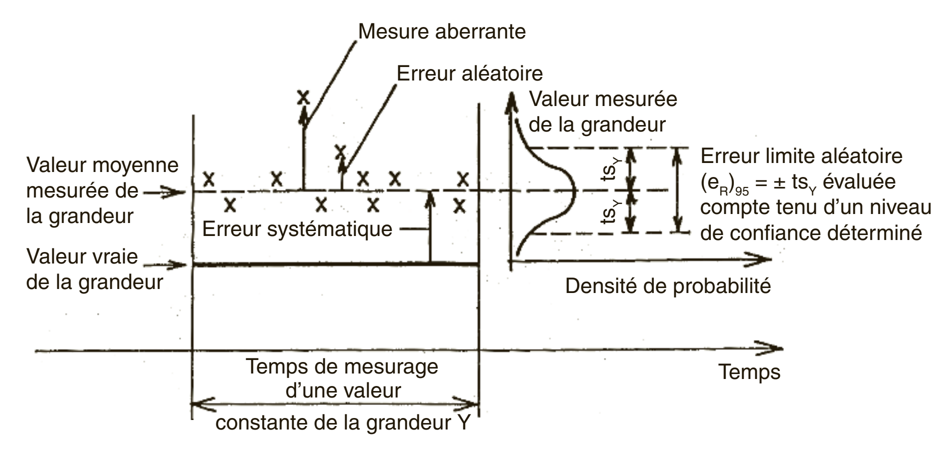


Figure 22.1 – Représentation graphique de l'incertitude de mesure (doc. AFNOR)

L'incertitude de mesure comprend, en général, plusieurs composantes.

Certaines peuvent être évaluées à partir de la distribution statistique des résultats de séries de mesurage et peuvent être caractérisées par des écarts types expérimentaux.

Les autres composantes, qui peuvent être caractérisées par des écarts types, sont évaluées en admettant des lois de probabilité d'après l'expérience acquise ou d'après d'autres sources d'informations (essais, recoupements…).

22.3.2 Erreur de mesure

L'erreur de mesure est liée aux conditions matérielles et environnementales dans lesquelles sont réalisées les mesures.

On peut citer principalement comme source d'erreur :

– la méthode de mesure inadaptée ;
– la qualité de l'intervenant ;
– les moyens de mesure ;
– les modifications environnementales ;
– les modifications de la matière elle-même ;
– etc.

L'erreur de mesure correspond au résultat d'un mesurage moins une valeur vraie de mesurande.

Étant donné qu'une valeur vraie ne peut pas être déterminée, on utilisera dans la pratique une valeur « conventionnellement vraie ».

22.3.3 Mesurande

Grandeur particulière soumise à mesurage.

22.3.4 Résultat de mesurage

Valeur attribuée à un mesurande obtenue par mesurage.

Lorsque l'on donne le résultat d'un mesurage, on doit indiquer si l'on se réfère :

- à l'indication ;
- au résultat brut ;
- au résultat corrigé ;
- si cela comporte une moyenne obtenue à partir de plusieurs valeurs.

L'expression complète du résultat d'un mesurage comprend les informations sur l'incertitude de mesure.

22.3.5 Erreur relative

Rapport de l'erreur de mesure à une valeur vraie du mesurande.

Pour l'erreur relative, étant donné qu'une valeur vraie ne peut pas être déterminée, dans la pratique, on utilisera une valeur dite « relative conventionnellement vraie ».

22.3.6 Erreur aléatoire

Résultat d'un mesurage moins la moyenne d'un nombre infini de mesurages du même mesurande effectués dans les conditions de répétabilité.

L'erreur aléatoire est égale à l'erreur moins l'erreur systématique. Comme on ne peut faire qu'un nombre fini de mesurages, il est seulement possible de déterminer une estimation de l'erreur aléatoire.

22.3.7 Erreur systématique

Moyenne qui résulterait d'un nombre infini de mesurages du même mesurande effectués dans les conditions de répétabilité, moins une valeur vraie du mesurande.

L'erreur systématique est égale à l'erreur moins l'erreur aléatoire. Comme pour l'erreur aléatoire, l'erreur systématique et ses causes ne peuvent pas être connues complètement. On peut néanmoins en corriger certaines (ex. : décalage du zéro).

22.3.8 Répétabilité des résultats de mesurage

Étroitesse de l'accord entre les résultats des mesurages successifs du même mesurande, mesurages effectués dans la totalité des mêmes conditions de mesure.

La répétabilité des résultats de mesurage dépend des conditions de réalisation suivantes :

- même mode opératoire ;
- même observateur ;
- même instrument de mesure utilisé dans les mêmes conditions ;
- même lieu ;
- répétition durant une courte période de temps.

22.3.9 Reproductibilté des résultats de mesurage

Étroitesse de l'accord entre les résultats des mesurages du même mesurande, mesurages effectués en faisant varier les conditions de mesure.

La reproductibilité des résultats de mesurage dépend des conditions que l'on peut faire varier :

– principe de mesure ;
– méthode de mesure ;
– observateur ;
– instrument de mesure ;
– étalon de référence ;
– lieu ;
– conditions d'utilisation ;
– temps.

22.3.10 Valeur vraie d'une grandeur

Valeur compatible avec la définition d'une grandeur particulière donnée.

La valeur vraie d'une grandeur correspond à une valeur que l'on obtiendrait par un mesurage parfait. Par nature, toute valeur vraie est donc indéterminée.

22.3.11 Valeur conventionnellement vraie d'une grandeur

Valeur attribuée à une grandeur particulière et reconnue parfois par convention, comme la représentant avec une incertitude appropriée pour un usage donné.

La valeur conventionnellement vraie est une valeur attribuée à la grandeur réalisée par un étalon de référence en un lieu donné et à des conditions ambiantes données ou en considération de propriétés de certains éléments physiques.

22.3.12 Écart-type expérimental

L'écart-type est la racine carrée de la variance.

Soit q le résultat d'un mesurage.

Pour une série de « n » mesurages du même mesurande, c'est la grandeur $s(q_k)$ caractérisant la dispersion des résultats, donnée par la formule :

$$s(q_k) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{n}(qk-\bar{q})^2}{n-1}}$$

avec :

q_k= résultat du $k_{ième}$ mesurage.

$\bar{q}$ = moyenne arithmétique des n résultats considérés.

Il représente la variabilité des valeurs observées q_k ou, plus spécifiquement, leur dispersion autour de leur moyenne $\bar{q}$.

22.3.13 Variance

La variance est habituelle estimée à s^2. Elle représente la dispersion des résultats des mesurages en fonction de la loi de probabilité :

$$s^2(q_k) = \frac{\sum_{k=1}^{n}(qk - \bar{q})^2}{n-1}$$

22.3.14 Valeur de la moyenne, écart type expérimental de la moyenne

Elle est donnée par l'équation caractéristique suivante :

$$s(\bar{q}) = \sqrt{s^2(\bar{q})} = \sqrt{\frac{s^2(q_k)}{n}} = \frac{s(q_k)}{\sqrt{n}}$$

22.3.15 Équation de base

La méthode GUM, issue de la norme NF EN 13005, est basée sur la modélisation mathématique du processus. Elle représente la relation entre les grandeurs d'entrée et le résultat de mesure (voir ci-après).

La modélisation mathématique du phénomène peut être complexe lorsque les valeurs à mesurer dépendent d'autres grandeurs, c'est à dire lorsque qu'elles sont corrélées. On s'attachera à simplifier l'équation de base de manière à éviter ce type de manipulation mathématique.

22.3.16 Incertitude élargie relative

L'incertitude est représentée par la lettre u.

L'incertitude élargie relative correspond au pourcentage d'incertitude annoncé par le constructeur du matériel de mesure.

$$x\% = \frac{\text{valeur vraie}}{\text{valeur mesurée}}$$

22.3.17 Incertitude élargie absolue

Elle s'obtient en multipliant la valeur mesurée q par le pourcentage d'incertitude élargie relative x % : x % . q.

22.3.18 Incertitude-type

C'est l'incertitude du résultat d'un mesurage exprimée sous la forme d'un écart-type (par exemple, la valeur 1/2 correspond à un intervalle de niveau de confiance égal à 95 %).

$$u^2 = \frac{1}{2}U$$

22.3.19 Incertitude-type composée

Lorsque le résultat d'un mesurage est obtenu à partir des valeurs de plusieurs autres grandeurs, l'incertitude-type de ce résultat est appelé « incertitude-type composée ».
C'est l'écart type estimé associé au résultat et il est égal à la racine carrée positive de la variance composée obtenue à partir de toutes les composantes de variances :

$$u_c = \sqrt{s^2}$$

22.3.20 Incertitude élargie absolue

L'objectif poursuivi avec cette incertitude élargie U est de fournir, autour du résultat d'un mesurage q, un intervalle dont on puisse s'attendre à ce qu'il comprenne une fraction élevée de la distribution des valeurs qui pourraient être attribuées raisonnablement au mesurande. Elle s'obtient par la multiplication de l'incertitude type composée u_c par un facteur d'élargissement k.
Le choix du facteur k , qui est habituellement compris entre 2 et 3, est fondé sur la probabilité ou le niveau de confiance exigé pour l'intervalle (voir ci-après).

$$U = k \cdot u_c$$

22.3.21 Incertitude élargie relative

C'est l'incertitude qui permet de déterminer le pourcentage d'erreur global qui entache le calcul effectué avec l'équation de base.
Si E est le résultat numérique de l'équation de base ;

$$y(\%) = \frac{U}{E}$$

22.4 Méthode d'évaluation de l'incertitude de mesurage

Comme nous l'avons écrit en début de cette présente partie, la méthode GUM permet la détermination de l'incertitude sur le mesurande en réalisant en 5 étapes principales :

– détermination du modèle mathématique ;
– identification et réduction des sources d'erreur ;
– estimation des incertitudes-types ;
– calcul de l'incertitude-type composée ;
– détermination de l'incertitude élargie.

22.4.1 Identification et réduction des erreurs

Un processus de mesure doit être analysé afin d'identifier tous les facteurs ou sources d'erreurs qui vont avoir un impact sur le résultat du mesurage.

Pour ce faire, on peut identifier les sources d'erreur en utilisant la méthode des « 5 M » de M. HISHIKAWA illustré par le schéma suivant :

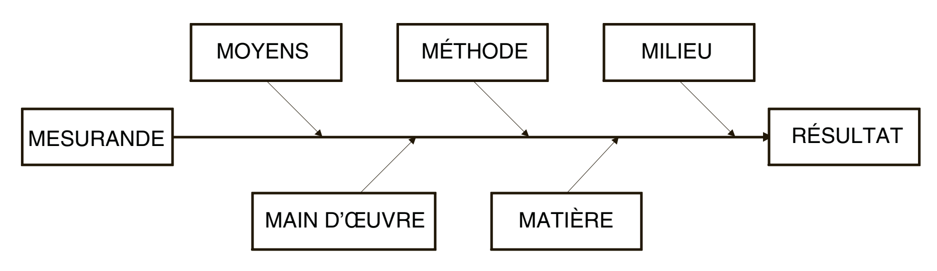


Figure 22.2 – Diagramme d'Hishikawa

Ce diagramme est aussi appelé « en arête de poisson ».
Les sources d'erreur peuvent être :

– les moyens de mesure : qualité du matériel, étalonnage… ;
– la méthode de mesure : nombre de mesurage, emplacement du point de mesure… ;
– le milieu environnemental : température, hygrométrie, pression… ;
– la main-d'œuvre : compétences de l'opérateur, erreur de lecture, manipulation… ;
– la matière elle-même ; variation, échantillonnage…

En appréhendant parfaitement les sources d'erreur, cela permet de réduire et de mieux maîtriser leur impact sur le mesurage.
Par exemple, appliquée à une mesure de température, ce diagramme pourrait être complété de la manière suivante :

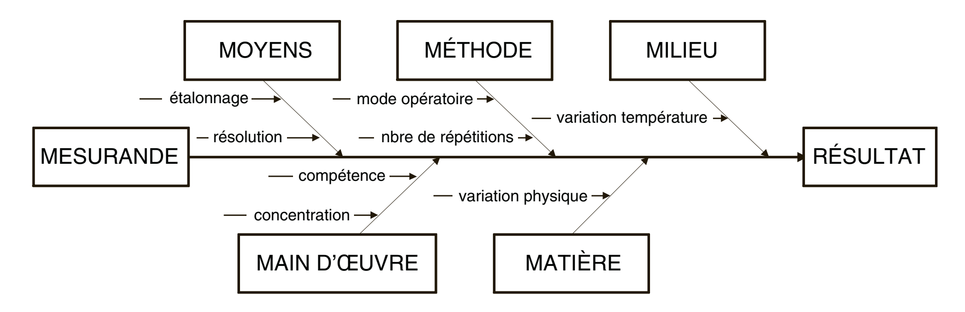


Figure 22.3 – Exemple de diagramme d'Hishikawa complété

L'évaluation des erreurs de mesurage est développée au chapitre 23.

22.4.2 Évaluation de l'incertitude type

Généralement, un mesurande Y n'est pas mesuré directement mais il est déterminé à partir de N autres grandeurs $X_1, X_2, \ldots, X_N$ à travers une relation fonctionnelle $Y = F(X_1, X_2, \ldots, X_N)$.

Exemple

Puissance Φ transférée (W) :

$$\Phi = mc(t_e - t_s)$$

avec

m = débit massique (kg/s).

c = chaleur massique (J/kg °C).

t_e, t_s = respectivement la température d'entrée et la température de sortie du fluide (°C).

Les grandeurs d'entrée m, c, t_e, t_s dont dépend la grandeur de sortie Y peuvent elles-mêmes être envisagées comme mesurandes et peuvent dépendre d'autres grandeurs.

Par exemple, le débit massique peut dépendre de la section de mesure (m^2), de la vitesse de passage (m/s) et de la masse volumique (kg/m^3).

La fonction F peut apparaître rapidement comme une relation fonctionnelle compliquée. C'est pour cela qu'une modélisation informatique sera souhaitable afin de simplifier les modes opératoires car ceux-ci s'avèrent répétitifs. Ceci sera confirmé dans la suite du présent document en regard des différentes fonctions à déterminer.

■ Évaluation de l'incertitude-type de type A

Cette évaluation de l'incertitude-type repose sur la **technique statistique**.

Dans la plupart des cas, la meilleure estimation disponible de l'espérance mathématique d'une grandeur q qui varie par hasard et pour laquelle on a obtenu n observations indépendantes q_k dans les mêmes conditions de mesure est la moyenne arithmétique des n observations.

D'une manière plus « statistique », on peut dire qu'elle est obtenue à partir d'une fonction de densité de probabilité déduite d'une distribution d'effectif observée :

$$\bar{q} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} q_k$$

Les valeurs des observations individuelles q_k diffèrent en raison des variations aléatoires des grandeurs d'influence ou des effets aléatoires.

On appelle s^2 la variance qui est donnée en fonction de la loi de probabilité :

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1}\sum_{k=1}^{n}(q_k - \bar{q})^2$$

La racine carrée positive de $s^2(q_k)$, appelée **écart type expérimental**, caractérise la variabilité des valeurs observées q_k ou, plus spécifiquement, leur dispersion autour de leur moyenne $\bar{q}$:

$$s(q_k) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{n}(q_k - \bar{q})^2}{n-1}}\ .$$

H

RAPPELS DE MÉTROLOGIE

Il y a lieu de déterminer alors la variance de la moyenne, appelée **écart type expérimental de la moyenne** $s(\bar{q})$:

$$s(\bar{q}) = \sqrt{s^2(\bar{q})} = \sqrt{\frac{s^2(q_k)}{n}} = \frac{s(q_k)}{\sqrt{n}}$$

$s(\bar{q})$ est la meilleure estimation de l'incertitude de $(\bar{q})$.

Nota

Dans le cas spécifique de la loi normale que l'on verra ci-après, on peut aussi calculer l'écart-type à partir de la valeur minimale $x_{\min}$ et de la valeur maximale $x_{\max}$ de l'échantillon de mesures selon l'étendue de celui-ci :

$$s = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{d_n}$$

avec d_n : coefficient dépendant de la taille de l'échantillon :

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d_n	1,13	1,69	2,06	2,33	2,53	2,70	2,85	2,97	3,08

Si n > 10, le meilleur indicateur est l'écart-type expérimental.

Exemple

Considérons deux groupes de 3élèves dans une même classe :

– les élèves du groupe 1 ont pour taille : 1,75 m ; 1,72 m ; 1,81 m.
– les élèves du groupe 2 ont pour taille : 1,57 m ; 2,10 m ; 1,61 m.

La moyenne $\bar{x}$ de chaque groupe est la même (1,76 m) et on se rend compte qu'il manque des informations pour caractériser chaque groupe. Il faut un deuxième indicateur : l'écart-type ou la variance « s ».
Avec le groupe 1, l'écart-type est :

$$s = \sqrt{\frac{(1{,}75 - 1{,}76)^2 + (1{,}72 - 1{,}76)^2 + (1{,}81 - 1{,}76)^2}{2}} = 0{,}045 \text{ m} = 4{,}5 \text{ cm}$$

Cela signifie que si l'on mesure un individu dans cette classe (x_i le résultat), sa valeur vraie est probablement dans l'intervalle $x_i \pm s$, donc $x_i \pm 4{,}5$ cm.
Avec la méthode de l'étendue :

$$s = \frac{1{,}81 - 1{,}72}{1{,}69} = 0{,}053 \text{ m} = 5{,}3 \text{ cm}$$

On peut remarquer que les résultats sont assez proches.
Avec le groupe 2, l'écart-type est :

$$s = \sqrt{\frac{(1{,}57 - 1{,}76)^2 + (2{,}10 - 1{,}76)^2 + (1{,}61 - 1{,}76)^2}{2}} = 0{,}29 \text{ m} = 29 \text{ cm}$$

Avec la méthode de l'étendue :

$$s = \frac{2{,}10 - 1{,}57}{1{,}69} = 0{,}31 \text{ m} = 31 \text{ cm}$$

On peut remarquer que les résultats sont là aussi assez proches mais avec des valeurs plus élevées que le 1er groupe. Cela provient du fait que les individus du 2e groupe ont des tailles plus dispersées que ceux du premier.
En comparant les écart-types de deux groupes, on remarque bien que la dispersion de mesures autour de la moyenne est un indicateur pertinent.
L'écart-type calculé précédemment donne un intervalle probable pour une valeur x_i. Mais lors d'un contrôle, il est fréquent de répéter n fois la mesure et de faire la moyenne $\bar{x}$ des résultats ; on peut alors connaître la plage des valeurs probables de $\bar{x}$.

$$s(\bar{x}) = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Suite de l'exemple :
Pour le groupe 1, l'écart-type estimé de la moyenne de la classe est :

$$s(\bar{x}) = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{0{,}045}{\sqrt{3}} \approx 0{,}03 \text{ m}$$

La taille moyenne est probablement située dans l'intervalle 1,76 ± 0,03 m.
Un résultat de mesure est donc représenté par la moyenne, mais aussi par le doute sur ce résultat qui est caractérisé par un écart-type. Dans la métrologie, cet écart-type est l'**incertitude de mesure**.
D'une manière plus « scientifique », on pourrait dire : « Pour une grandeur d'entrée X_i déterminée à partir de n observations répétées indépendantes $X_{i,k}$, l'incertitude type $u(x_i)$ de son estimation $x_i = \bar{X}_i$ est $u(x_i) = s(\bar{X}_i)$ ».

On appelle $u^2(x_i) = s^2(\bar{X}_i)$ la variance de type A et $u(x_i) = s(\bar{X}_i)$ l'incertitude type de type A.

■ Évaluation de l'incertitude-type de type B

Cette évaluation de l'incertitude-type repose sur la **connaissance des phénomènes liés au processus**.
Contrairement à l'incertitude type de type A, l'incertitude type de type B n'est pas basée à partir d'observations répétées mais elle est évaluée par un jugement scientifique fondé sur toutes les informations disponibles au sujet de la variabilité possible de X_i et qui peuvent comprendre :

– des résultats de mesures antérieurs ;
– l'expérience ou la connaissance générale du comportement et des propriétés des matériaux et instruments utilisés ;
– les spécifications du fabricant ;
– les données fournies par des certificats d'étalonnage ou d'autres certificats ;
– l'incertitude assignée à des valeurs de référence provenant d'ouvrages et manuels.

On peut utiliser une évaluation de type B notamment lorsqu'une évaluation de type A est fondée sur un nombre relativement faible d'observations statistiquement indépendantes.

22.4.3 Évaluation de l'incertitude-type composée

Il y a lieu de distinguer deux cas distincts.

1. **Les grandeurs d'entrées ne sont pas corrélées**, c'est à dire que toutes les grandeurs d'entrée sont indépendantes

Exemple

Puissance d'une résistance électrique :

$$P = \frac{V^2}{R_0[1 + \alpha(t - t_0)]}$$

avec :
V = différence de potentiel aux bornes du dipôle passif (la résistance dépend de la température).
R_0 = résistance à température définie t_0.
α = coefficient linéaire de température.
La puissance P, le mesurande, est dissipée par la résistance à la température t et est fonction de (V, R_0, α, t), valeurs d'entrée indépendantes entre elles.

2. **Les grandeurs d'entrée sont corrélées**, c'est-à-dire interdépendantes.

Exemple

Plusieurs résistances connectées en série. On comprend aisément qu'il y a composition des incertitudes types de chaque résistance et que les variables d'entrée de chaque résistance dépendent du comportement exact de la résistance précédente.

■ Incertitude-type composée de grandeurs d'entrée non corrélées

L'incertitude-type est aussi appelée « variance ».
L'incertitude type de y, où y est l'estimation du mesurande Y (résultat du mesurage), est obtenue par une composition des incertitudes types des estimations d'entrée $x_1, x_2, \ldots, x_n$.
Cette incertitude, notée $u_c(y)$, est un écart type estimé et caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient être raisonnablement attribuées au mesurande Y.
Chaque $u(x_i)$ est une incertitude-type évaluée comme précédemment pour l'évaluation de type A ou l'évaluation de type B.

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^{n} \left[\frac{\partial f}{\alpha x_i}\right]^2 u^2(x_i)$$

Suite de l'exemple précédent :

$$P = \frac{V^2}{R_0[1 + \alpha(t - t_0)]}$$

$$\frac{\partial P}{\partial V} = \frac{2V}{R_0[1 + \alpha(t - t_0)]} = \frac{2P}{V}$$

$$\frac{\partial P}{\partial R_0} = -\frac{V^2}{R_0^2[1+\alpha(t-t_0)]} = -\frac{P}{R_0}$$

$$\frac{\partial P}{\partial \alpha} = -\frac{V^2(t-t_0)}{R_0[1+\alpha(t-t_0)]} = -\frac{P(t-t_0)}{R_0[1+\alpha(t-t_0)]}$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -\frac{V^2\alpha}{R_0[1+\alpha(t-t_0)]^2} = -\frac{P\alpha}{1+\alpha(t-t_0)}$$

$$\Rightarrow u^2(P) = \left[\frac{\partial P}{\partial V}\right]^2 . u^2(V) + \left[\frac{\partial P}{\partial R_0}\right]^2 \cdot u^2(R_0) + \left[\frac{\partial P}{\partial \alpha}\right]^2 \cdot u^2(\alpha) + \left[\frac{\partial P}{\partial t}\right]^2 \cdot u^2(t)$$

= incertitude type composée de P.

■ **Incertitude-type composée de grandeurs d'entrée corrélées**

L'incertitude type est aussi appelée « variance ».
La variance composée $u_c^2(y)$ associée au résultat du mesurage s'écrit alors :

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} \frac{\partial f}{\partial x_i} . \frac{\partial f}{\partial j} . u(x_i, x_j)$$

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^{n}\left[\frac{\partial f}{\partial x_i}\right]^2 u^2(x_i) + 2\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n} \frac{\partial f}{\partial x_i} . \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j)$$

C'est la loi de propagation des incertitudes où :
x_i et x_j sont les estimations de X_i et X_j
= $u(x_i,x_j) = u(x_j,x_i)$ est la covariance estimée associée à x_i et x_j.

Exemple

Deux masses A et B de valeur nominale 50 g sont comparées à un même étalon E. A et B sont ensuite utilisées simultanément pour réaliser un étalon de 100 g. Quelle est l'incertitude sur la masse $y = A + B$?
On peut écrire :

$$A = E + x_1$$

$$B = E + x_2$$

$$y = A + B$$

En appliquant la loi de propagation de l'incertitude :

$$u_c^2(y) = u^2(A) + u^2(B) + 2u(A, B).$$

On note la présence du terme de covariance $2u(A,B)$.
On peut écrire différemment le modèle de manière à éviter le terme de covariance :

$$y = E + x_1 + E + x_2.$$

H

RAPPELS DE MÉTROLOGIE

En appliquant la loi de propagation de l'incertitude :

$$u_c^2(y) = u^2(E) + u^2(x_1) + u^2(E) + u^2(x_2)$$

On remarque que $2u(A,B) = 2u^2(E)$ car la covariance de A et B est la variance de leurs termes communs : ce qui est commun à A et B, c'est l'étalon E.

La loi de propagation peut parfois se simplifier, notamment dans les cas suivants :

– cas où les grandeurs d'entrée sont indépendantes (les termes de covariance sont alors nuls) :

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^{n} \left[\frac{\partial f}{\partial x_i}\right]^2 u^2(x_i)$$

– cas où les grandeurs d'entrée sont indépendantes et où le modèle est linéaire :

$$y = x_1 + x_2 + \ldots + x_n$$

$$u_c^2(y) = u^2(x_1) + u^2(x_2) + \ldots + u^2(x_n)$$

$$\text{alors } \frac{u_c^2(y)}{y^2} = \frac{u^2(x_1)}{x_1^2} + \frac{u^2(x_2)}{x_2^2} + \ldots + \frac{u^2(x_n)}{x_n^2}$$

– cas où l'on peut estimer un coefficient de corrélation $r(x_i,x_j)$ (les termes de covariance ne sont pas nuls) :

$$u(x_i,x_j) = u(x_i) \cdot u(x_j) \cdot u(x_i,x_j)$$

Dans le cadre de l'industrie énergétique par exemple, il peut y avoir corrélation entre deux grandeurs d'entrée si l'on utilise pour leur détermination le même instrument de mesure ou la même donnée de référence ayant une incertitude type significative.

Ce peut être le cas lors de l'utilisation d'un thermomètre utilisé pour estimer la valeur de la grandeur d'entrée X_i et aussi utilisée pour corriger la valeur de la grandeur d'entrée X_j. X_i et X_j sont alors corrélées.

Par contre, si X_i et X_j sont définis comme des valeurs non corrigées et que les grandeurs qui définissent la courbe d'étalonnage du thermomètre sont incluses comme grandeur d'entrée additionnelles avec des incertitudes types indépendantes, la corrélation entre X_i et X_j disparaît.

22.4.4 Évaluation de l'incertitude élargie

Bien que l'écart type $u_c(y)$ puisse être utilisé pour exprimer l'incertitude d'un résultat de mesure, il est souvent nécessaire, pour certaines applications industrielles ou réglementaires, de donner une mesure de l'incertitude qui définisse, autour du résultat de mesure, un intervalle à l'intérieur duquel on puisse espérer voir se situer une large fraction de la distribution des valeurs qui pourraient être raisonnablement attribuées au mesurande.

Il s'agit de l'incertitude élargie notée « U » :

$$U = k \cdot U_c(y)$$

avec :
k = facteur d'élargissement.

Le résultat du mesurage s'écrit sous la forme :

$$Y = y \pm U$$

$$\text{soit } y - U < Y \leq y + U\,.$$

Le choix de la valeur du facteur d'élargissement k se fait sur la base du niveau de confiance accordé lorsque la loi de probabilité caractérisée par y et $u_c(y)$ est approximativement « Normale ».
Le chapitre suivant expose des différentes lois de distribution que l'on peut utiliser.

22.4.5 Les lois de distribution

Une loi de distribution est représentée dans un graphique où les valeurs possibles de la grandeur mesurée sont représentées sur l'axe des abscisses et leur fréquence, ou probabilité d'apparition, sur l'axe des ordonnées.
Elle dépend de la loi de distribution (ou loi de densité de probabilité) qui donne des indications sur les fréquences d'apparition des valeurs possibles.
Le niveau de confiance est une notion tout à fait pratique et découle de l'expérience.

■ La loi dite « normale »

La loi de distribution dite « normale » est aussi appelée courbe de Laplace-Gauss. Elle a une courbe en forme de cloche.

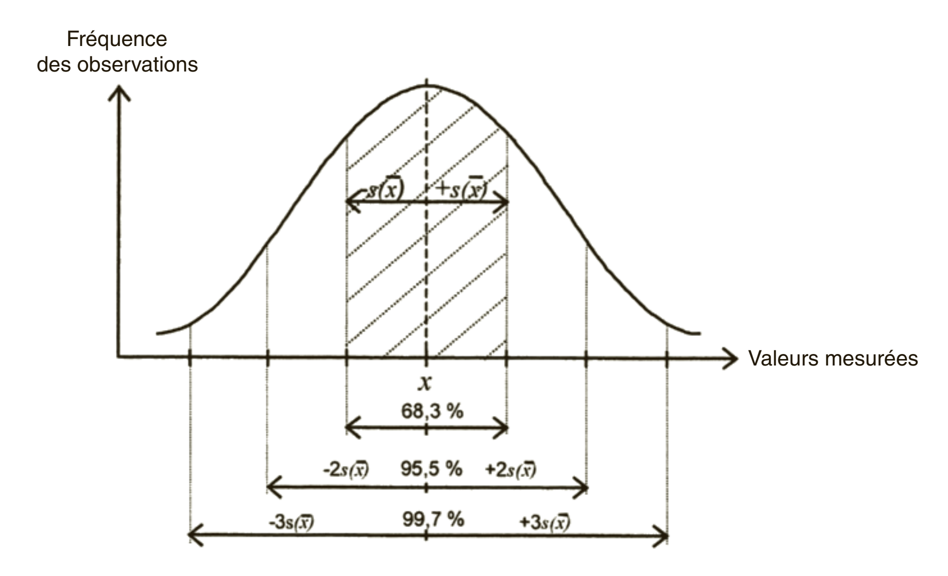


Figure 22.4 – Courbe de la loi « normale »

H

RAPPELS DE MÉTROLOGIE

Prenons une série de n résultats indépendants x_i qui se répartissent selon une distribution normale (voir courbe ci-avant). L'écart-type de la moyenne $s(\bar{x})$ de cette série est calculé grâce à la formule exposée précédemment :

$$s(\bar{q}) = \sqrt{s^2(\bar{q})} = \sqrt{\frac{s^2(q_k)}{n}} = \frac{s(q_k)}{\sqrt{n}}$$

On remarque que la distribution des résultats est centrée sur la moyenne. C'est autour d'elle que l'on trouve le plus de valeurs. Mais plus on s'éloigne de cette zone et plus la fréquence d'apparition des valeurs diminue, d'où la forme en cloche caractéristique de la loi Normale.

La loi de distribution étant Normale, des calculs statistiques sur cette dernière montrent qu'il y a 68,3 % de chance pour que la moyenne ait une valeur vraie, qui soit encadrée par plus moins un écart-type, c'est-à-dire qu'elle soit comprise dans l'intervalle [$x \pm s(\bar{x})$].

Mais donner un résultat en affirmant qu'il a 68,3 % de chance d'être vraie, et donc 31,7 % d'être erroné n'est peut-être pas satisfaisant. Il est parfois préférable de prendre un intervalle de confiance plus large, c'est-à-dire de plusieurs écart-type pour améliorer la confiance dans le résultat. On définit alors un intervalle de confiance par :

$$\boxed{\bar{x} \pm k.s(\bar{x})}$$

avec :

k : facteur de confiance (ou d'élargissement).

$s(\bar{x})$ est une incertitude et $k.s(\bar{x})$ est une incertitude élargie.

Tableau 22.1 – Facteur de confiance *k*

Niveau de confiance p(%)	Facteur de confiance *k*
68,27	1
90	1,645
95	1,96
95,45	**2**
99	2,576
99,73	3

L'incertitude retenue peut définir, par exemple, un intervalle correspondant à un niveau de confiance de 90, 95 ou 99 pour cent, soit respectivement les facteurs k égaux à 1,645, 1,96 et 2,576.

Il est difficile, dans l'industrie énergétique, de considérer un niveau de confiance égal ou supérieur à 99 % car cela signifierait qu'il n'y aurait seulement qu'une chance sur cent pour que le mesurande soit en dehors de l'intervalle (facteur d'élargissement égal à 3 pour 99,73 %). Ceci serait vraiment très optimiste.

C'est pour cela que nous retenons généralement l'intervalle de confiance de **95,45 %** environ, ce qui suppose donc que le mesurande *Y* a 5 % de « malchance » d'être en dehors de cet intervalle, c'est-à-dire qu'il y a seulement 1 risque sur 20. Le facteur d'élargissement *k* correspondant à la loi normale est alors égal à **2**.

La loi de Student

La distribution de Student ressemble à une loi normale « aplatie ». À mesure que le nombre *n* d'observations augmente, elle tend à se confondre avec la distribution normale vue ci-avant. L'approximation devient intéressante à partir de $n \geq 30$.

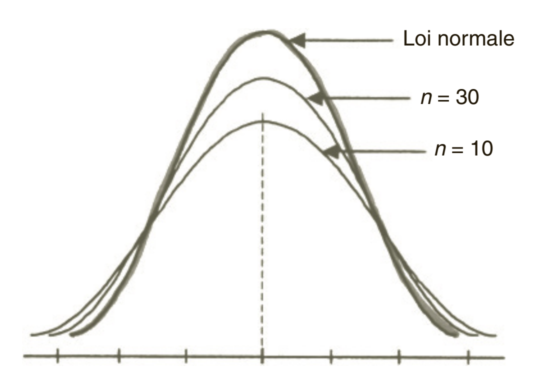


Figure 22.5 – Courbe de la loi de Student

Là aussi, des calculs statistiques permettent d'obtenir pour un niveau de confiance donné, un facteur d'élargissement appelé « *t* » cette fois.

Dans le cas de la loi normale, *k* dépendait du niveau de confiance retenu, alors que *t* dépend en plus du degré de liberté, c'est-à-dire du nombre d'observations moins une.

Le tableau 22.2 (page suivante) détermine les valeurs de *t*.

Le rapprochement des deux lois lorsque *n* augmente, se vérifie à travers les valeurs de la table de *t*, puisque pour un même niveau de confiance donné et *n* très grand (∞), la valeur de *t* correspond exactement à elle de *k*.

Exemple

Pour un même niveau de confiance de 95,45 % :

– la loi normale donne $k = 2$;
– la loi de Student donne :
  • pour $n - 1 = 20$; $t = 2{,}13$.
  • pour $n - 1 \to \infty$; $t = 2$.

On peut considérer que la loi de Student est une loi générale, utilisable dans tous les cas, et que la loi normale en est un cas particulier.

H

RAPPELS DE MÉTROLOGIE

Tableau 22.2 – Table des valeurs de *t*

Table des valeurs de *t*						
Nombre de degrés de liberté	**Niveau de confiance (%)**					
	68,27	**90**	**95**	**95,45**	**99**	**99,73**
Valeur de *t*						
1	1,84	6,31	12,71	13,97	63,66	235,80
2	1,32	2,92	4,30	4,53	9,92	19,21
3	1,20	2,35	3,18	3,31	5,84	9,22
4	1,14	2,13	2,78	2,87	4,60	6,62
5	1,11	2,02	2,57	2,65	4,03	5,51
6	1,09	1,94	2,45	2,52	3,71	4,90
7	1,08	1,89	2,36	2,43	3,50	4,53
8	1,07	1,86	2,31	2,37	3,36	4,28
9	1,06	1,83	2,26	2,32	3,25	4,09
10	1,05	1,81	2,23	2,28	3,17	3,96
11	1,05	1,80	2,20	2,25	3,11	3,85
12	1,04	1,78	2,18	2,23	3,05	3,76
13	1,04	1,77	2,16	2,21	3,01	3,69
14	1,04	1,76	2,14	2,20	2,98	3,64
15	1,03	1,75	2,13	2,18	2,95	3,59
16	1,03	1,75	2,12	2,17	2,92	3,54
17	1,03	1,74	2,11	2,16	2,90	3,51
18	1,03	1,73	2,10	2,15	2,88	3,48
19	1,03	1,73	2,09	2,14	2,86	3,45
20	1,03	1,72	2,09	2,13	2,85	3,42
25	1,02	1,71	2,06	2,11	2,79	3,33
30	1,02	1,70	2,04	2,09	2,75	3,27
35	1,01	1,70	2,03	2,07	2,72	3,23
40	1,01	1,68	2,02	2,06	2,70	3,20
45	1,01	1,68	2,01	2,06	2,69	3,18
50	1,01	1,68	2,01	2,05	2,68	3,16
100	1,005	1,660	1,984	2,025	2,626	3,077
•	1,000	1,645	1,960	2,000	2,576	3,000

Les autres lois

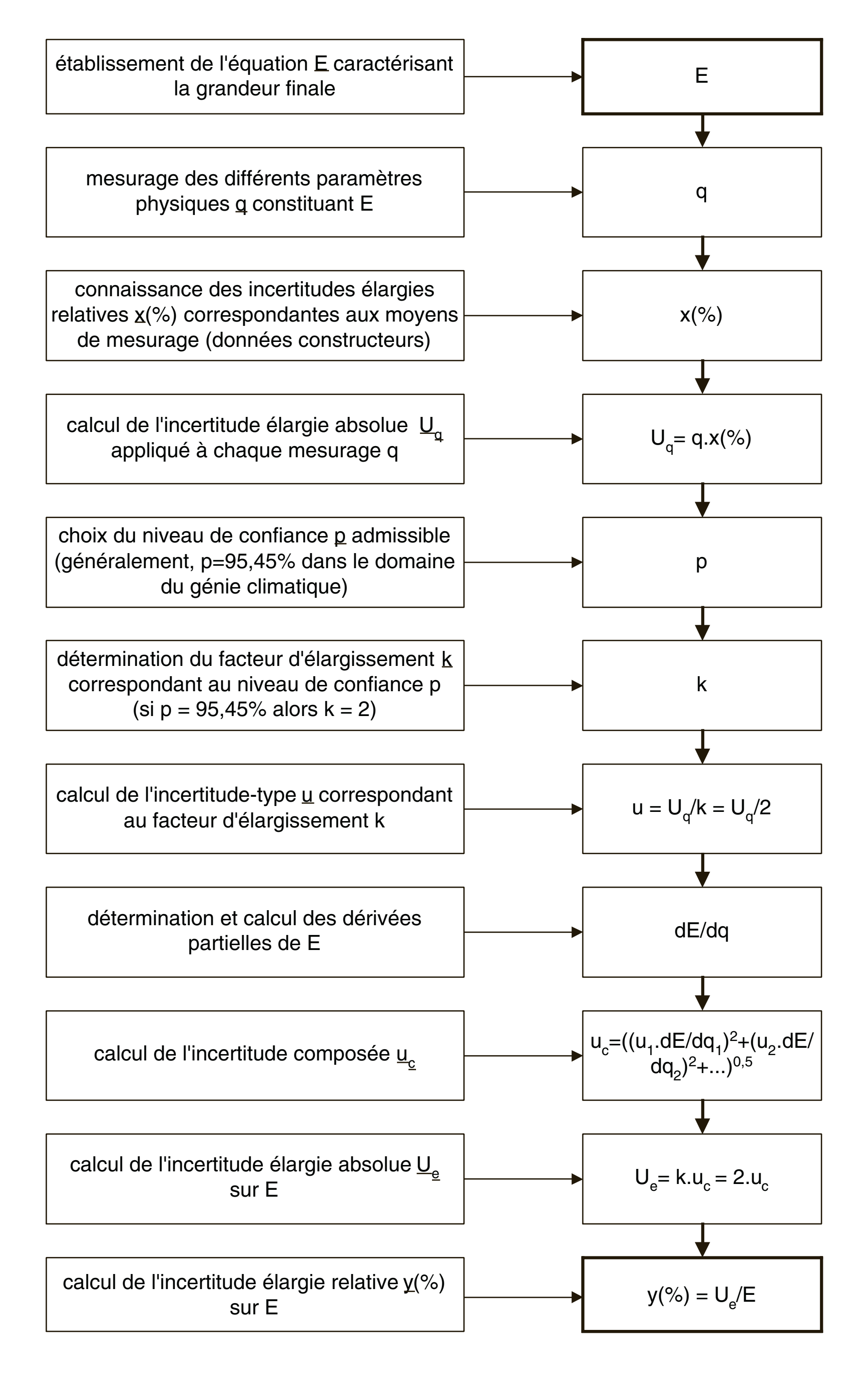
Il existe aussi d'autres lois applicables lorsque leurs bornes peuvent être définies par des valeurs finies a_- et a_+ représentant les limites de variation du phénomène étudié. Nous les citons pour information :

- loi rectangulaire symétrique ;
- loi triangulaire symétrique ;
- loi en dérivée d'arc sinus ;
- loi triangulaire asymétrique.

Dans le domaine du génie climatique, ces lois sont rarement utilisées car les limites de variation du phénomène sont souvent mal définies.

22.4.6 Schéma de synthèse

Les différentes phases de l'évaluation de l'incertitude de mesurage peuvent être synthétisées selon le schéma suivant. Voir exemple de calcul au chapitre 24.



H

RAPPELS DE MÉTROLOGIE

23 • LES ERREURS DE MESURAGE

23.1 Évaluation des erreurs de mesurage

Un mesurage présente en général des imperfections qui occasionnent une erreur dans le résultat de mesure.
On retient traditionnellement qu'une erreur possède 2 composantes :

Erreur = erreur systématique + erreur aléatoire

23.1.1 Rappels de définitions

Erreur systématique : Moyenne qui résulterait d'un nombre infini de mesurages de même mesurande, effectués dans les conditions de répétabilité moins une valeur vraie du mesurande.
Erreur aléatoire : Résultat d'un mesurage moins la moyenne d'un nombre infini de mesurages du même mesurande, effectués dans les conditions de répétabilité.

Résultat de mesure = valeur vraie + erreur systématique + erreur aléatoire

On notera que lorsque la totalité des composantes de l'erreur a été identifiée et que les corrections ont été apportées, il subsiste encore une incertitude sur la validité du résultat, comme détaillé dans le chapitre précédent.
L'erreur systématique ne peut pas être éliminée mais elle peut souvent être réduite. Si une erreur systématique se produit sur un résultat de mesure à partir d'un effet reconnu d'une grandeur d'influence, l'effet peut être corrigé pour le compenser en partie (ex. : décalage du zéro d'un instrument de mesure, variation de la température ambiante).
L'erreur aléatoire provient probablement de variations temporelles et spatiales non prévisibles de grandeur d'influence. Plus on augmentera le nombre d'observations, mieux on pourra la quantifier et la réduire.
Par exemple, l'intervention humaine lors de la mesure génère inévitablement des erreurs de mesures aléatoires, comme décrit précédemment dans l'exploration du champ de vitesse à l'aide d'un Pitot. On peut distinguer :

– la mauvaise position de la sonde par rapport aux points de mesure définis,
– l'inclinaison de la sonde par rapport à l'axe de la conduite,
– une mauvaise méthode d'intégration,
– la mauvaise lecture de la pression dynamique lorsque l'on utilise un tube incliné ou équivalent,
– etc.

Il y a également des facteurs physiques qui peuvent être mal appréhendés :
- la dimension réelle de la section de mesure,
- la détermination de la masse volumique du fluide,
- les fluctuations de la vitesse lors d'effets pulsatoires notamment,
- les phénomènes de turbulences,
- l'obstruction créée par la sonde dans le conduit, etc.

Tous ces aléas représentent des sources d'erreurs et nous avons souvent recours aux expériences antérieures pour apprécier les incertitudes de mesures. Dans le cas du facteur « humain » notamment, l'estimation des écarts types relève souvent d'un jugement basé sur la rigueur intellectuelle de l'intervenant et sur son objectivité.

Une bonne connaissance de l'utilisation de ses appareils de mesure, un suivi annuel de leur étalonnage et des différents capteurs utilisés permettra déjà de minimiser les sources d'erreurs systématiques et aléatoires.

23.2 L'intervalle de tolérance

Toute exigence sur une grandeur est encadrée d'un intervalle de tolérance. Il s'agit de la zone de valeurs acceptables que peut prendre cette grandeur.

L'intervalle de tolérance représente en fait la limite d'erreurs tolérées.

Chaque individu a sa propre zone de tolérance et dons sa propre estimation de la conformité. Cela relève du subjectif et deux personnes obtenant la même valeur lors d'un mesurage peuvent classer différemment le produit.

Aussi, pour pouvoir se prononcer sur une conformité, il est indispensable de définir une zone de tolérance au sein de laquelle on accepte de s'écarter de la valeur nominale.

La zone de tolérance peut être symétrique ou asymétrique :

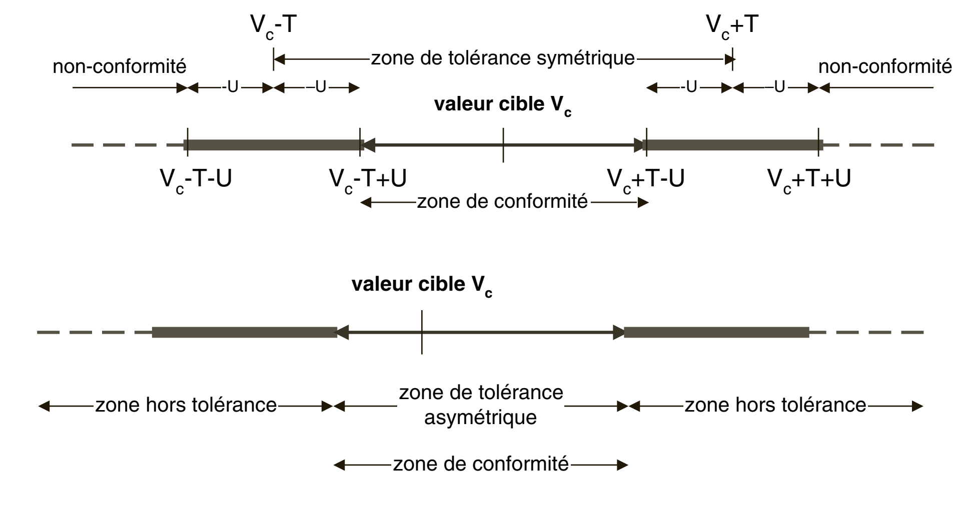


Figure 23.1 – Zone de tolérance symétrique et zone de tolérance asymétrique

23.2.1 La capabilité

Le bon sens montre alors qu'il est nécessaire que l'incertitude de mesure soit suffisamment faible par rapport à la tolérance. Cette adéquation entre ces deux valeurs s'appelle la « capabilité ». On l'exprime généralement par le rapport de l'incertitude U sur la tolérance T.

$$\text{capabilité} = \frac{\text{incertitude}}{\text{tolérance}} = \frac{U}{T}$$

La capabilité admise varie entre 1/2 comme limite maximale et 1/10 dans le cas de mesure délicate. Autrement dit, on considère comme acceptable le fait que la tolérance soit de deux à dix fois plus élevée que l'incertitude de mesure.

Exemple

Considérons le cas d'un industriel qui souhaite maintenir une enceinte thermique à 400 °C ± 0,9 °C.

L'entreprise dispose de 3 méthodes différentes pour contrôler que la température réponde bien à cette contrainte :

– la méthode 1 avec un thermomètre d'incertitude U ± 0,6 °C, d'où une capabilité de 0,6/0,9 = 0,666 et une tolérance égale à 1,5 fois l'incertitude ;
– la méthode 2 avec un thermomètre d'incertitude U ± 0,3 °C, d'où une capabilité de 0,3/0,9 = 0,333 et une tolérance égale à 3 fois l'incertitude ;
– la méthode 3 avec un thermomètre d'incertitude U ± 0,1 °C, d'où une capabilité de 0,1/0,9 = 0,111 et une tolérance égale à 9 fois l'incertitude.

Dans les trois cas, le résultat du contrôle est supposé être égal à 400,5 °C.

La figure 23.2 ci-dessous récapitule les résultats :

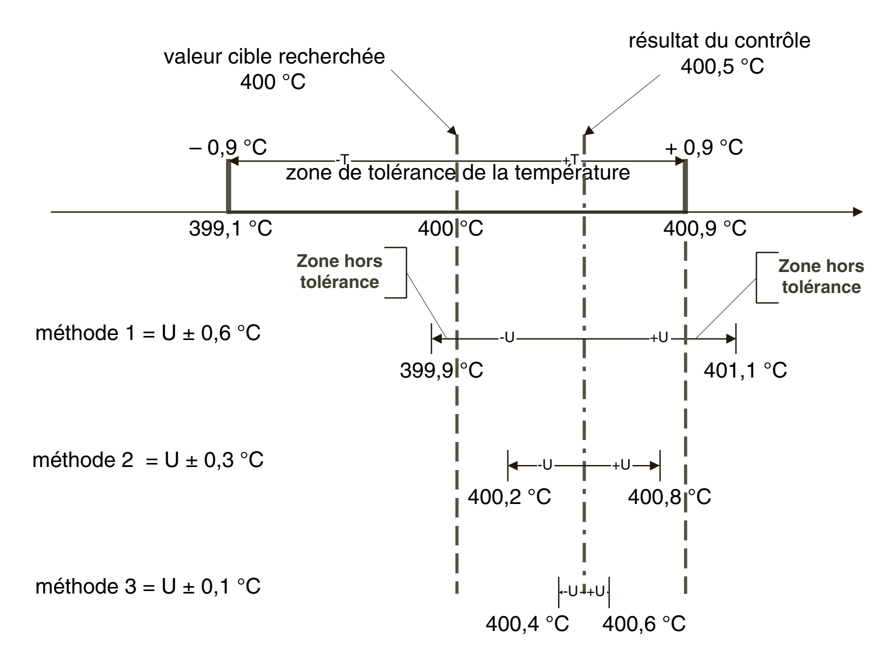


Figure 23.2 – Résultats

Les résultats de ces contrôles sont les suivants :

– avec la méthode 1 (T = 1,5U), la longueur vraie de la température risque d'être au-delà de la tolérance supérieure. On note que plus l'incertitude de mesure est importante, et plus il est difficile de se prononcer sur la conformité de l'enceinte thermique car on risque de déclarer non conforme une température qui ne l'est peut-être pas. La température est déclarée **non conforme** ;
– avec la méthode 2 (T = 3U), les valeurs vraies possibles de la température de l'enceinte sont dans la zone de tolérance avec toutefois la tolérance supérieure qui est proche de la tolérance maximale admissible (400,8 °C pour 400,9 °C). Celle-ci est donc déclarée **conforme** ;
– avec la méthode 3 (T = 9U), les valeurs vraies possibles de la température sont dans la zone de tolérance. Celle-ci est donc déclarée **conforme**.

En conclusion, nous pouvons constater que plus la capabilité, exprimée par le rapport U/T, est petite et plus la confiance dans le résultat du contrôle est grande.
De même, dans ce cas là, le nombre de mesurage déclarés non conforme s'en trouve diminué.
Enfin, en connaissant avec plus d'exactitude la température, on peut améliorer le processus de fabrication en agissant sur les paramètres influents et ainsi augmenter la qualité de la production.
Dans certain cas, l'incertitude peut être 20 fois plus faible que la tolérance. Il faut alors considérer que plus l'incertitude de mesure est faible, plus le coût du dispositif de mesure sera élevé, tant du point de vue investissement que du point de vue mise en œuvre et métrologique.
Il convient donc d'évaluer le juste besoin pour mettre en adéquation la qualité des appareils de mesure et la tolérance acceptable afin de ne pas générer de surcoût inutile.

23.2.2 Décision après mesurages

Nous avons vu dans l'exemple précédent qu'il était parfois difficile de se prononcer sur la conformité ou non d'une valeur lorsque la grandeur caractéristique chevauche celle de la tolérance.
Par exemple, en reprenant le schéma caractéristique vu ci-avant pour le cas de la tolérance symétrique :

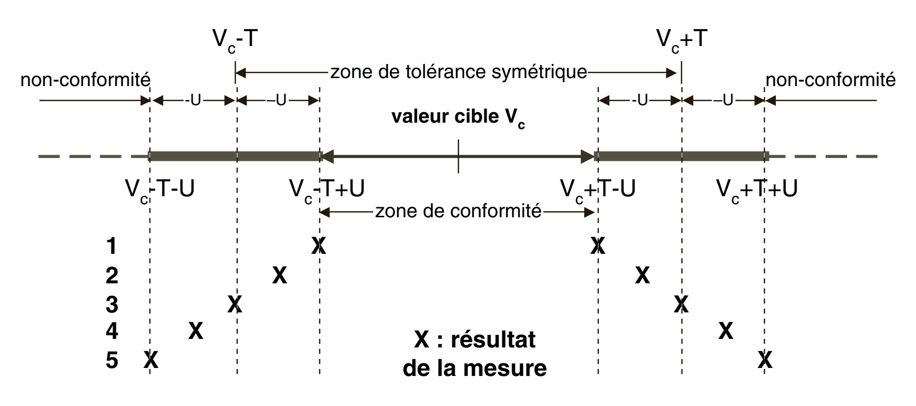
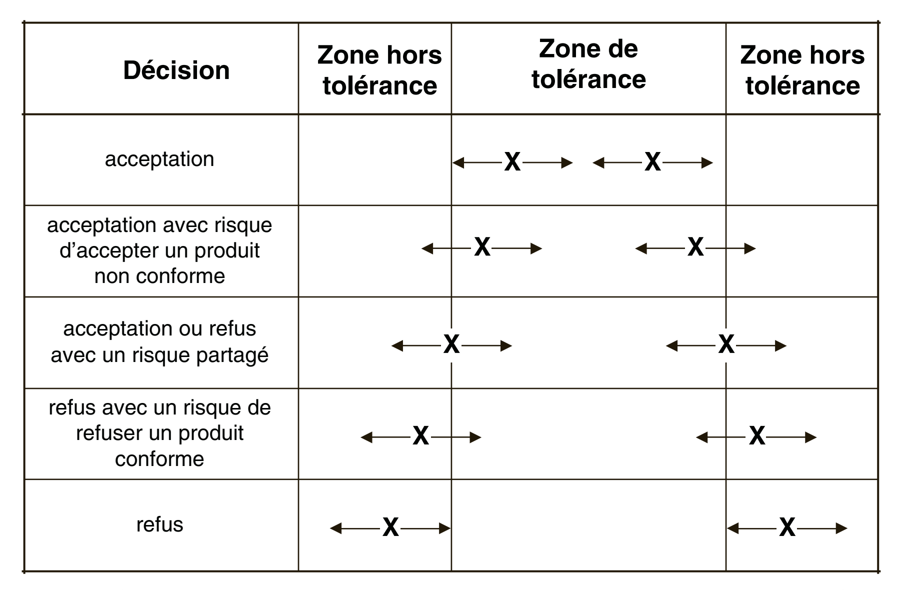


Figure 23.3 – Cas d'une tolérance symétrique

Ce qui amènerait au tableau de synthèse suivant :

Résultat	Limite inférieure		Limite supérieure	Décision
Inférieur à	Vc-T-U			Non conforme
Compris entre	Vc-T-U	et	Vc-T+U	Doute
Compris entre	Vc-T+U	et	Vc+T-U	Conformité
Compris entre	Vc+T-U	et	Vc+T+U	Doute
Supérieur à			Vc+T+U	Non conforme

En conclusion, les décisions à prendre seraient les suivantes :



On se rend compte qu'en matière de mesurage, la qualité du matériel et leur mode d'utilisation sont prépondérants et doivent toujours être adaptés à la précision requise.

Dans le domaine du génie climatique, nous sommes rarement contraints à des précisions de résultats incompatibles avec la précision de nos matériels de mesure, mais les méthodes de mesurages sont souvent mal appréhendées par les utilisateurs.

24 • ANNEXES

24.1 Exemple de calcul d'incertitude d'un mesurage d'énergie thermique par débitmètre d'eau chaude

Le calcul d'incertitude-type de grandeurs non corrélées, développé au chapitre 22 est utilisé ci-dessous pour le calcul d'incertitude d'un mesurage d'énergie thermique d'après l'équation :

$$E = q_V \,.\, \mathrm{Cp} \,.\, (T_d - T_r)$$

avec :
E = énergie thermique, en kWh.
q_v = débit volumique d'eau, en m^3/h.
Cp = capacité thermique volumique de l'eau, en kWh/m^3 °C.
T_d = température de départ de l'eau, en °C.
T_r = température de retour de l'eau, en °C.
Les constructeurs ont indiqué les incertitudes de mesure relatives à attendre de leurs équipements suivantes :

- le débitmètre = ± 3 % de la mesure.
- les sondes de températures = ± 0,25 % de la mesure exprimée en °C.

La valeur du Cp de l'eau est considérée comme constante (1,14 kWh/m^3 °C), ce qui entraîne une incertitude de 0,5 % en moyenne sur la plage de mesure.
Toutes les incertitudes et dérivées partielles sont calculées selon les équations indiquées dans la colonne de gauche du tableur (voir tableau 24.1).
L'utilisation d'un tableur informatique, tel que celui représenté ci-après, permet de modéliser l'équation mathématique de l'énergie produite, avec les incertitudes liées aux différents composants du processus, de faire varier très facilement les paramètres de fonctionnement et d'apprécier les résultats obtenus.
Dans l'exemple présent, pour un débit horaire de 69 m^3/h et un deltaT de 20 K, et compte tenu de la qualité des matériels de mesurage utilisés, l'incertitude sur le résultat serait de ± 4,01 %.

Tableau 24.1 – Exemple de calcul d'incertitude élargie relative

Débit d'eau (qv) (m^3/h) :	69
Capacité thermique (Cp) (kWh/m^3 °C) :	1,14
Température départ (Td) (° C) :	90,00
Température retour (Tr) (° C) :	70,00
Énergie thermique produite	
$E = q_v \cdot Cp \cdot (Td - Tr)$ (kWh) =	1 573,20
Incertitude élargie relative constructeurs (en %)	
Uq_v / q_v =	3,00 %
UC_p / Cp =	0,50 %
UT_d / Td =	0,25 %
U_{Tr} / Tr =	0,25 %
Incertitude élargie absolue	
Uq_v =	2,07
U_{cp} =	0,01
U_{Td} =	0,23
U_{Tr} =	0,18
Incertitude type définissant un intervalle avec un niveau de confiance de 95 %	
$Uq_v = 1/2 \cdot Uq_v$ =	1,0350
$U_{cp} = 1/2 \cdot U_{cp}$ =	0,0029
$U_{Td} = 1/2 \cdot U_{Td}$ =	0,1125
$U_{Tr} = 1/2 \cdot U_{Tr}$ =	0,0875
Dérivée partielle (E)	
$dq_v = dE/dq_v = Cp \cdot (Td - Tr)$	2,28E + 01
$dcp = dE/dcp = q_v \cdot (Td - Tr)$	6,21E + 03
$dTd = dE/dTd : q_v \cdot Cp$	7,87E + 01
$dTr = dE/dTr : q_v \cdot Cp$	7,87E + 01
Incertitude composée	
$(ue)^2 = (dq_v \times uq_v)^2 + (dCp \times uCp)^2 + (dTd \times uTd)^2 + (dTr \times uTr)^2$ =	9,96E + 02
ue = incertitude sur E =	31,556
Ue = 2 . ue = incertitude élargie absolue sur E =	63,112
Ue/E = incertitude élargie relative sur E =	4,01 %

ÉNERGIE THERMIQUE = 1 573,20 kWh +/– 4,01 %

24.2 Exemple de calcul d'incertitude d'un mesurage d'énergie thermique par diaphragme vapeur

Cet exemple concerne le calcul d'incertitude liée à l'utilisation d'un débitmètre à diaphragme pour la détermination de l'énergie thermique produite.

Le calcul d'incertitude-type de grandeurs non corrélées développé au chapitre 22 est utilisé ci-dessous pour le calcul d'incertitude d'un mesurage d'énergie thermique d'après l'équation caractéristique (vue au chapitre « Les mesures de débits hydrauliques ») :

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}}\varepsilon\frac{\pi}{4}d^2\sqrt{2\Delta p.\rho}$$

avec :

q_m = débit-masse traversant le col (kg/s).

C = coefficient de décharge normalisé.

β = rapport des diamètres de l'orifice $\frac{d}{D}$ (sans dimension).

d = diamètre du col (ou de l'orifice) dans les conditions de service (m).

D = diamètre interne de la conduite dans les conditions de service en amont de l'élément déprimogène (m).

ε = coefficient de détente normalisé.

Δp = pression différentielle (Pa).

ρ_1 = masse volumique du fluide en amont (kg/m^3).

Le rapport $\frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}}$ se symbolise parfois par la lettre α et s'appelle alors le « coefficient de débit ».

Nota

Les équations détaillées nécessaires au calcul du coefficient de décharge C ainsi que les tableaux correspondants, et les valeurs du coefficient de détente ε pour les diaphragmes, sont indiqués en annexe du chapitre « Les mesures de débits hydrauliques ».

L'énergie est calculée selon l'équation :

$$E = q_m \cdot (h_1 - h_2)$$

En posant : $A = \frac{\pi}{4}d^2$

On peut écrire :

$$E = \alpha.\varepsilon.A.\sqrt{2.\Delta P.\rho}.(h_1 - h_2)$$

avec :

E = énergie thermique, en kWh.

α = coefficient de débit donné par le constructeur, sans dimension.

ε = coefficient de détente normalisé, sans dimension.

A = section de passage du fluide, en m^2.

ΔP = écart de pression « amont – aval » du diaphragme, en Pa.

ρ = masse volumique du fluide, en kg/m^3.

h_1 = enthalpie du fluide en entrée du processus, en kJ/kg.

h_2 = enthalpie du fluide en sortie du processus, en kJ/kg.

Tableau 24.2 – Exemple de calcul d'incertitude élargie relative

Alpha :	0,69
Epsilon :	0,9806
A (m^2) :	0,00950
Pression différentielle deltaP (Pa) :	11 750
Masse volumique rhô (kg/m^3) :	11,60
Enthalpie vapeur h1 (kJ/kg) :	2 803,30
Enthalpie eau alimentaire h2 (kJ/kg) :	405,00
Énergie thermique produite	
E = alpha . epsi . A .(2 . deltap . rhô)^{0,5} . (h1 – h2) (kWh) =	8 048,80
Incertitude élargie relative constructeurs (en %)	
U_{deltap} / deltap =	0,15 %
U_{alpha} / alpha =	4,00 %
$U_{rhô}$ / rhô =	0,50 %
Uh1 / h1 =	0,75 %
Uh2 / h2 =	0,75 %
Incertitude élargie absolue	
U_{deltap} =	17,63
U_{alpha} =	0,03
$U_{rhô}$ =	0,06
Uh1 =	21,02
Uh2 =	3,04
Incertitude type définissant un intervalle avec un niveau de confiance de 95 %	
U_{deltap} = 1/2 . U_{deltap} =	8,8125
U_{alpha} = 1/2 . U_{alpha} =	0,0138
$U_{rhô}$ = 1/2 . $U_{rhô}$ =	0,0290
U_{h1} = 1/2 . U_{h1} =	10,5124
U_{h2} = 1/2 . U_{h2} =	1,5188
Dérivée partielle (E)	
ddeltap = dE/ddeltap = alpha . epsi . A . 2. rhô/(2 . deltap .rhô)^{0,5} . (h1 – h2)	6,85E – 01
dalpha = dE/dalpha = epsi . A . (2 . deltap .rhô)^{0,5} . (h1 – h2)	1,17E + 04
drhô = dE/drhô = alpha . epsi . A . 2 . deltap/(2 . deltap .rhô)^{0,5} . (h1 – h2)	6,94E + 02
dh1 = dE/dh1 = alpha . epsi . A . (2 . deltap .rhô)^{0,5}	3,36E + 00
dh2 = dE/dh2 = alpha . epsi . A . (2 . deltap .rhô)^{0,5}	3,36E + 00
Incertitude composée	
$(ue)^2 = (dddeltap \times udeltap)^2 + (dalpha \times ulpha)^2 + (drhô \times urhô)^2 + (dh1 \times uh1)^2 + (dh2 \times uh2)^2$ =	2,76E + 04
ue = incertitude sur E =	166,208
ue = 2 . ue = incertitude élargie absolue sur E =	332,417
ue/E = incertitude élargie relative sur E =	4,13 %

ÉNERGIE THERMIQUE = 8 048,80 kWh +/– 4,13 %

24.3 Incertitude de mesure dans un conduit aéraulique

La mesure d'un débit volumique de l'air ou de gaz peut se faire de manière intrusive par exploration du champ des vitesses dans un conduit aéraulique au moyen d'un tube de Pitot dans les conditions suivantes :

– fluide incompressible, sinon d'un nombre de Mach ≤ 0,25 ;
– température d'arrêt automatique dans toute la section de mesure ;
– remplissage complet de la conduite ;
– régime permanent.

24.3.1 Rappel du principe général de la méthode

Nota

Le principe d'exploration du champ de vitesse est détaillé dans le chapitre « Les mesures de débits aérauliques ».

1. Mesure des dimensions de la section de mesurage qui aura été choisie perpendiculairement à l'axe de la conduite. Au voisinage de la section de mesure, l'écoulement doit être sensiblement parallèle et symétrique par rapport à l'axe de la conduite. La longueur droite de la gaine qui peut être nécessaire pour satisfaire à ces conditions varie avec la vitesse de l'écoulement, les singularités amont, les singularités aval et le niveau des turbulences.
   À titre indicatif, on considère généralement une longueur droite minimale ***amont*** de 20 fois le diamètre pour une section circulaire (ou 80 fois le rayon hydraulique pour une section quelconque) et ***aval*** de 5 fois le diamètre (ou 20 fois le rayon hydraulique), comme satisfaisante (rappel : $D_h = \dfrac{2ab}{a+b}$).
2. Définition de la position des différents points de mesure suivant une des 3 méthodes arithmétiques suivantes :
   • méthode « Log-Tchebycheff »,
   • méthode « Log-linéaire »,
   • méthode « AICVF ».

   Nous n'évoquerons pas ici la méthode dite « intégration graphique du champ des vitesses », ni la méthode dite « intégration numérique du champ des vitesses » car elles consistent à tracer un graphique du profil des vitesses et à planimétrer par les points de mesure pour définir leurs valeurs (méthode graphique) ou à intégrer, de manière analytique, une courbe algébrique (méthode intégration numérique) qui sont peu pratiques et sont peu utilisées dans le cadre d'essais de performances dans le domaine du génie thermique.
3. Mesure de la pression différentielle existant entre les prises de pression totale et statique du tube de Pitot placé en ces points de mesure, et la masse volumique du fluide dans les conditions de mesure.
4. Détermination de la vitesse locale de l'écoulement.
5. Détermination de la vitesse débitante.

24.3.2 Méthode « log-Tchebycheff »

Par hypothèse, la forme mathématique de la loi de répartition des vitesses en fonction de la distance à la paroi est logarithmique dans les éléments disposés à la périphérie de la section et polynomiale dans les autres éléments.

H

RAPPELS DE MÉTROLOGIE

La position de chaque point de mesurage de la vitesse est détaillée en annexe du chapitre « Aéraulique ».

24.3.3 Méthode « log-linéaire »

Par hypothèse, la forme mathématique de la loi de répartition des vitesses de chaque élément est :

$$u = \mathrm{A} \log(y) + \mathrm{B}y + \mathrm{C}$$

avec :
y = distance à la paroi.
A, B et C = constantes quelconques.
La position de chaque point de mesurage de la vitesse est détaillée en annexe du chapitre « Aéraulique ».

24.3.4 Erreurs sur l'évaluation de la vitesse locale (« log-Tchebycheff » et « log-linéaire »)

Dans ces deux méthodes, nous retrouvons les mêmes sources d'erreurs.

■ **Erreurs aléatoires**

□ **Erreur sur la mesure de la pression différentielle**

La mesure de la pression différentielle est nécessairement entachée d'une erreur aléatoire $\delta_{\Delta p}$ due à la fois au manomètre, aux conduites de liaison entre tube de Pitot et manomètre, à une obstruction éventuelle des conduits (condensation, glace,…), et à l'opérateur. Toutefois, cette erreur ne comprend pas certains effets perturbateurs tels que les fluctuations, qui seront pris en compte séparément dans les paragraphes suivants.

□ **Erreur due aux fluctuations lentes de la vitesse**

On fera une erreur aléatoire δ_f si le temps de mesure n'est pas assez long pour permettre une intégration correcte des fluctuations lentes de la vitesse d'écoulement. L'erreur diminue lorsque le nombre et la durée des mesures en un point donne augmentent.

□ **Erreur sur la masse volumique**

On commettra sur la masse volumique une erreur δ_ρ due à l'imprécision des mesures de température, de pression et d'hygrométrie (pour l'air), et à la plus ou moins grande pureté du fluide en général. Ces erreurs sont d'importance très variables suivant la nature et les conditions du fluide.

□ **Erreur due au calcul de la correction de compressibilité**

On commettra, dans le calcul du facteur de correction de compressibilité $(1 - \varepsilon)$ une erreur aléatoire δ_c.

■ **Erreurs systématiques**

Dans ce qui suit, on suppose que les corrections à appliquer pour tenir compte de l'obstruction, du gradient de vitesse, de la turbulence et de la perte de charge n'ont pas été apportées.

Si elles l'ont été, du fait de l'incertitude notable qui règne sur ces corrections, on commettra néanmoins une erreur systématique mais qui peut être positive ou négative et dont la valeur absolue est évidemment bien moindre que dans le premier cas.

☐ **Erreur due à l'étalonnage du tube de Pitot**

Toute erreur sur le coefficient d'étalonnage d'un tube de Pitot influe de façon systématique sur la vitesse mesurée et introduit une erreur e_c.

☐ **Erreur due à la turbulence**

L'erreur commise croit avec le degré de turbulence de l'écoulement mesuré et elle est toujours positive, c'est-à-dire que la valeur mesurée de la vitesse est toujours plus grande que la vitesse réelle de l'écoulement.
L'erreur résultante e_t sur la vitesse mesurée sera la même pour toutes les mesures en un même point et à même vitesse, bien que les erreurs changent en fonction du débit d'une part et de l'emplacement de mesure d'autre part.
Se reporter au chapitre « Aéraulique » pour ce qui concerne l'utilisation pratique d'un tube de Pitot.

☐ **Erreur due au gradient transversal de vitesse**

L'erreur commise e_g est fonction du diamètre du tube de Pitot par rapport au diamètre de la conduite, elle est toujours positive. Se reporter au chapitre « Aéraulique » pour ce qui concerne l'utilisation pratique d'un tube de Pitot.

☐ **Erreur due à l'obstruction de la conduite**

Cette erreur e_b croît lorsque l'obstruction de la conduite par le tube de Pitot. Elle est toujours positive. Se reporter au chapitre « Aéraulique » pour ce qui concerne l'utilisation pratique d'un tube de Pitot.

☐ **Erreur due à l'inclinaison du tube de Pitot par rapport à la direction de l'écoulement**

Cette erreur e_φ croît avec l'angle d'inclinaison et est fonction du tube de Pitot utilisé, elle est toujours positive lorsque l'inclinaison est supérieure à 3°.
Se reporter au chapitre « Aéraulique » pour ce qui concerne l'utilisation pratique d'un tube de Pitot.

☐ **Erreur due à la perte de charge entre les prises de pression totale et statique**

Cette erreur e_ξ croît avec l'éloignement des prises de pression et avec la rugosité de la conduite, elle est toujours positive.

■ **Calcul de l'écart type**

L'écart type σ_v associé à une mesure de la vitesse locale v s'obtient en combinant les écarts types des erreurs provenant des différentes sources.
Malgré la distinction entre erreurs systématiques et erreurs aléatoires, la probabilité de distribution des valeurs possibles de chaque composante systématique est

H

RAPPELS DE MÉTROLOGIE

essentiellement gaussienne. La combinaison des erreurs aléatoires et systématiques peut donc être traitée comme si elles étaient toutes effectivement aléatoires ; les écarts types sur les composantes systématiques s'obtiennent par le calcul. Ainsi, l'écart type d'une composante systématique donnée est-il la moitié de l'incertitude maximale, en plus ou en moins, sur cette composante.

L'écart type relatif sur la mesure de la vitesse locale est donc la racine carrée de la somme des carrés des écarts types relatifs provenant des sources énumérées. Le résultat de la mesure d'une vitesse locale est donc :

$$v\left[1 \pm 2\sqrt{\frac{1}{4}\left(\frac{\sigma_{\Delta p}}{\Delta\rho}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_f}{v}\right)^2 + \frac{1}{4}\left(\frac{\sigma_p}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\varepsilon}{v}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_c}{v}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_i}{v}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_g}{v}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\varphi}{v}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_b}{v}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\xi}{v}\right)^2}\right] = v\left(1 \pm 2\frac{\sigma_v}{V}\right)$$

avec un niveau de confiance de 95 %.

$\sigma_{\Delta p}$ étant l'écart type de l'erreur sur la pression différentielle.
σ_p étant l'écart type de l'erreur sur la masse volumique.
σ_f étant l'écart type dû aux fluctuations lentes de la vitesse.
σ_ε étant l'écart type dû à la correction de compressibilité.
σ_c étant l'écart type dû à l'étalonnage du tube de Pitot.
σ_t étant l'écart type dû aux fluctuations à haute fréquence de la vitesse et à la turbulence.
σ_g étant l'écart type dû au gradient de vitesse.
σ_φ étant l'écart type dû à l'inclinaison du tube de Pitot par rapport à la direction de l'écoulement.
σ_b étant l'écart type dû à l'incertitude sur la correction de l'effet d'obstruction.
σ_ξ étant l'écart type dû à la perte de charge.

24.3.5 Erreurs sur l'estimation du débit (« log-Tchebycheff » et « log-linéaire »)

En plus des erreurs décrites au chapitre précédent, nous retrouvons aussi les mêmes sources d'erreurs avec ces deux méthodes :

■ Erreurs aléatoires

□ Erreur due aux mesures de la vitesse locale

Les erreurs sur les mesures de la vitesse locale ne sont pas purement aléatoires puisqu'elles dépendent en partie de l'emplacement de la mesure dans la conduite. Cependant, l'erreur sur chaque mesure est différente, et sa partie primordiale est de nature aléatoire, de telle sorte que l'erreur globale δ_{ut} apportée à l'estimation du débit peut être considérée comme aléatoire.

□ Erreur due au positionnement du tube de Pitot

Si les erreurs associées au positionnement des tubes de Pitot sont indépendantes entre elles, l'influence totale introduira une erreur aléatoire δ_l sur l'estimation du débit. Cependant, si la distance entre le tube de Pitot et la paroi est au moins égale au diamètre de l'étrave d, cette erreur est négligeable.

■ Erreurs systématiques

□ Erreur due à la mesure des dimensions de la conduite

Bien que l'on évalue l'aire A de la section de mesure du débit à partir de la moyenne de plusieurs mesures des dimensions de la conduite, il subsiste néanmoins une erreur systématique e_λ dans le débit calculé.

□ Erreur due au nombre de points de mesure

Si la courbe de répartition des vitesses n'est pas parfaitement lisse, le nombre de points de mesure peut ne pas être suffisant pour la définir convenablement, d'où une erreur systématique e_p.

■ Calcul de l'écart type

À nouveau, les valeurs possibles des erreurs systématiques données précédemment ont une probabilité de distribution essentiellement gaussienne, de telle façon que toutes les erreurs peuvent être traitées comme si elles étaient aléatoires dans le but d'évaluer l'écart type sur le débit.
L'écart type relatif sur la mesure de débit est donc la racine carrée de la somme des carrés des écarts types dus aux sources énumérées précédemment. Ainsi, le résultat de la mesure de débit est-il :

$$\text{Débit } = q_v\left[1 \pm 2\sqrt{\left(\frac{\sigma_v}{V}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_l}{q_v}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{q_v}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_l}{q_v}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\Lambda}{A}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_p}{q_v}\right)^2}\,\right]$$

$$= q_v\left(1 \pm 2\frac{\sigma_{\eta v}}{q_v}\right)$$

en considérant un niveau de confiance de 95 %.
avec :
q_v étant l'écart type sur les mesures de la vitesse locale calculé comme indiqué précédemment.
q_i étant l'écart type dû à la méthode d'intégration.
q_m étant l'écart type associé à l'estimation de la valeur de m .
q_l étant l'écart type dû au positionnement du tube de Pitot.
q_Λ étant l'écart type sur l'évaluation de l'aire de la section de mesure.
q_p étant l'écart type dû au nombre de points de mesure de la vitesse.
On remarque que ces deux méthodes d'exploration des champs de vitesse nécessitent des calculs relativement complexes pour connaître l'incertitude de mesure.

24.3.6. Méthode « NF EN 12599 »

Exposée notamment dans la norme NF EN 12599 de juillet 2000 relative à la ventilation des bâtiments, cette méthode d'exploration des champs de vitesse est également décrite dans les ouvrages de l'AICVF, du COSTIC et de l'ASHAE.
Elle est basée sur une division de la section d'écoulement en surfaces égales mais celles-ci seront sous formes d'anneaux circulaires concentriques, méthode dite des « centroïdes d'aires égales ». La position de chaque point de mesurage de la vitesse est détaillée dans le chapitre « Mesure de débits aérauliques ».

Cette méthode présente l'avantage de proposer le pourcentage d'erreur probable en fonction de la distance du point de mesurage par rapport à l'obstacle situé en amont. Plus la section sera grande, plus le nombre de points de mesure sera élevé.
De la même manière que les deux méthodes de mesure précédemment décrites (« Log-linéaire » et « Log-Tchebycheff »), la méthode « NF EN 12599 » propose aussi une méthode pour déterminer le nombre de points de mesure en vue d'explorer le champ de vitesse dans un conduit aéraulique. De plus, concernant les incertitudes de mesure, cette méthode présente l'avantage d'être plus simple d'utilisation car la valeur de l'incertitude est déjà estimée et ne nécessite pas de calcul supplémentaire.

Rappel : Détermination du nombre de points de mesure

Le tableau ci-dessous indique le nombre de points de mesure pour effectuer des relevés avec une imprécision de 10 et de 20 %, en fonction de la distance du plan de mesure par rapport à la première perturbation située en amont. Cette perturbation, ou singularité, peut être un composant du système : ventilateur, batterie…, un changement de direction du conduit, un embranchement ou un changement de section. Les valeurs indiquées tiennent compte d'une incertitude de 5 % ou 10 % apportée par l'appareil de mesure.
La distance relative (L_r) est calculée en nombre de diamètres :

$$L_r = \frac{L}{D}$$

L et D sont donnés dans la même unité.
L est la distance entre le plan de mesure et le premier accident de circuit en amont.
D est soit le diamètre du conduit s'il est circulaire, soit le diamètre hydraulique.

Tableau 24.3 – Détermination du nombre de points de mesure

Distance relative L_r	**Nombre minimum de points de mesure pour une incertitude sur la mesure du débit de ± 10 % ou ± 20 % incluant l'incertitude de l'appareil de mesure de ± 5 ou 10 %**		
	± 10 % (dont ± 5 %)	**± 20 % (dont ± 5 %*)**	**± 20 % (dont ± 10 %)**
1,6	-	15	20
2,0	50	10	14
2,5	34	7	10
3,0	25	6	8
4,0	16	4	5
5,0	12	3	3
6,0	8	2	3

Exemple d'utilisation

Un conduit de section circulaire a un diamètre de 0,2 m. Si la mesure peut être faite à 1 m de la première perturbation du réseau, cette distance relative est $L_r = 1/0,2 = 5$. Si une incertitude de 10 % est tolérée, il faut mesurer les vitesses en 12 points.

Si une incertitude de 20 % est tolérée, il suffit de mesurer les vitesses en 3 points, au minimum.
Cette méthode d'estimation de l'incertitude de mesure est plus rapide que celle nécessaire aux méthodes « Log-Tchebycheff » et « Log-Linéaire » dans le contexte des installations de génie climatique.

24.4 Incertitude de mesure des compteurs thermiques (NF EN 1434)

L'énergie thermique qui traverse un circuit caloporteur est déterminée par la relation :

$$Q = \int_{t_0}^{t_1} q_m.\Delta h.dt$$

avec :
Q = quantité d'énergie (J).
q_m = débit massique (kg/s).
Δh = variation d'enthalpie ($J.kg^{-1}.K^{-1}$).
t = temps.

Si l'instrument détermine la masse par des moyens volumétriques :

$$Q = \int_{v_0}^{v_1} k.\Delta\theta.dV$$

avec :
Q = quantité d'énergie (J).
k = coefficient thermique défini dans la norme NF EN 1434 pour l'eau k (pression, température d'entrée, température de sortie) ; pour un autre fluide, le fabricant doit mentionner le coefficient d'énergie thermique utilisé en fonction de la température et de la pression.
$\Delta\theta$ = différence de température entre l'entrée et la sortie.
V = volume de liquide écoulé.

Le compteur d'énergie thermique se compose :

– d'un dispositif de mesure du volume de liquide caloporteur du type débitmètre mécanique à turbine, émetteur à impulsions, émetteur d'ultrasons…,
– de deux sondes de température appairées, une en entrée et l'autre en sortie, du type résistance de platine Pt 100 ou Pt 1 000,
– d'un intégrateur qui renferme les cartes de traitement de mesure, le calculateur, l'afficheur.

L'erreur relative se décompose en 3 termes : $E_{\text{compteur}} = E_{\text{débit}} + E_{\text{température}} + E_{\text{calculateur}}$.

24.4.1 Erreur maximale pour un compteur d'énergie complet

Les compteurs d'énergie thermique sont reportés en 3 classes de précision, la classe 1 étant la plus précise.

E = Erreurs maximales tolérées = incertitude sur l'énergie.
Pour un compteur d'énergie combiné, l'erreur maximale tolérée est la somme arithmétique des erreurs maximales tolérées pour chaque sous-ensemble.

$$\text{Classe 1 : } E = \pm\left(2 + 4\frac{\Delta T_{\min}}{\Delta T} + 0{,}01\frac{q_p}{q}\right)\%$$

$$\text{Classe 2 : } E = \pm\left(3 + 4\frac{\Delta T_{\min}}{\Delta T} + 0{,}02\frac{q_p}{q}\right)\%$$

$$\text{Classe 3 : } E = \pm\left(4 + 4\frac{\Delta T_{\min}}{\Delta T} + 0{,}05\frac{q_p}{q}\right)\%$$

Avec :
E = erreur relative (%).
$\Delta T_{\min}$ = différence de température minimale mesurable (K).
q = débit massique mesuré (m^3/h).
q_p = débit permanent (ou nominal) (m^3/h).

24.4.2 Incertitude sur la mesure du débit d'eau

$$\text{Classe 1 : } E_f = \pm\left(2 + 0{,}01\frac{q_p}{q}\right) \text{ avec maxi } \pm 5\ \%$$

$$\text{Classe 2 : } E_f = \pm\left(2 + 0{,}02\frac{q_p}{q}\right) \text{ avec maxi } \pm 5\ \%$$

$$\text{Classe 3 : } E_f = \pm\left(3 + 0{,}05\frac{q_p}{q}\right) \text{ avec maxi } \pm 5\ \%$$

La classe 1 est plus précise que la classe 2, etc.
Le choix du mesureur dépend de la bonne détermination du débit le traversant.

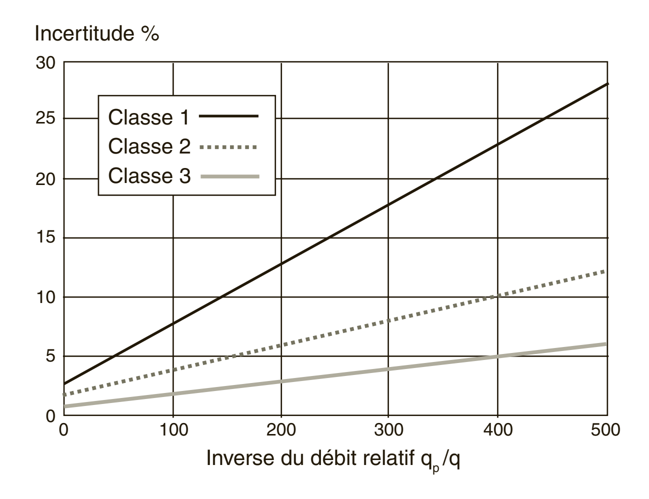


Figure 24.1 – % d'incertitude en fonction de l'inverse du débit mesuré

On considère :

– Le débit permanent q_p : débit normal auquel le mesureur peut fonctionner de manière satisfaisante sans interruption. Le débit caractérise la gamme du mesureur. La norme NF EN 1434-1 précise que l'erreur maximale tolérée est applicable aux compteurs hydrauliques ayant $q_p \geq 100$ m^3/h.

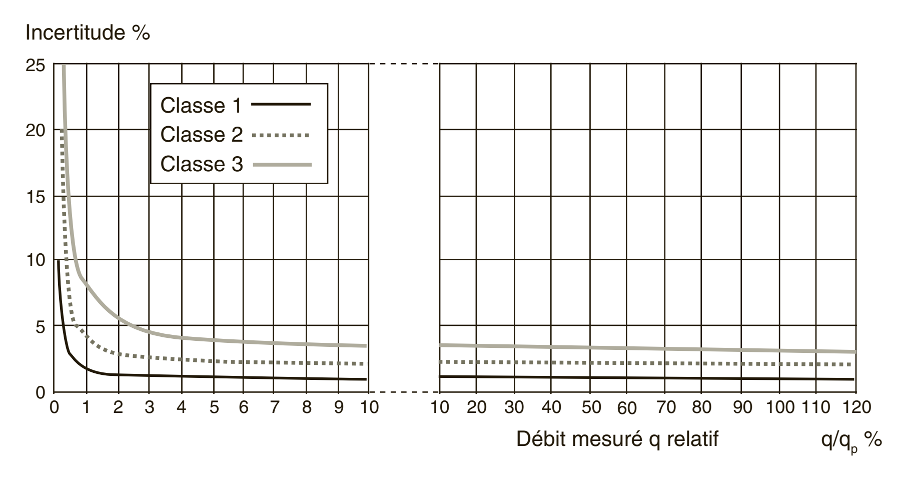


Figure 24.2 – % d'incertitude en fonction du débit par classe de débitmètre

– Le débit de surcharge (q_s ou $q_{\max}$) : débit auquel le compteur doit fonctionner de manière satisfaisante pour une courte période de temps (< 1 h/j ou 200 h/an) sans détérioration. Cette valeur n'est pas normalisée et les constructeurs prévoient généralement $q_{\max} = 2 \cdot q_p$.

– Le débit minimal (p_i ou $p_{\min}$) : débit le plus petit à partir duquel le compteur doit fonctionner en respectant les incertitudes indiquées par sa classe. Les valeurs $p_{\min}$ sont indiquées dans la norme indépendamment de la classe, elles n'entrent pas dans le calcul de l'incertitude. Ces valeurs sont données par le rapport $\dfrac{q_p}{q_{\min}}$ égal à 10, 25, 50, 100 ou 250, soit une valeur de $p_{\min}$ de 10 %, 4 %, 2 %, 1 % ou 0,4 % du débit permanent q_p.

– Le débit de transition (q_t) : valeur du débit intermédiaire entre le débit de surcharge et le débit minimal qui partage l'étendue de mesure en deux zones : la zone supérieure et la zone inférieure. Chaque zone est caractérisée par une plage d'incertitude.

– Le débit de démarrage (q_{dem}) : débit à partir duquel le compteur se met en fonctionnement.

Il apparaît donc que le choix du calibre d'un mesureur n'est pas anodin.

Pour un circuit à débit constant, il faut choisir un débit permanent q_p égal ou supérieur au débit à mesurer.

Pour un circuit à débit variable, il est souhaitable de choisir un mesureur qui présente un débit de surcharge $q_{\max}$ égal au débit maximum de l'installation et un débit permanent q_p égal au débit minimal véhiculé.

Il est à noter que la norme NF EN 1434 précise les tolérances correspondantes à des appareils neufs. Au cours de son exploitation, les erreurs d'un mesureur mécanique ne peuvent qu'augmenter à cause de l'usure. On peut en déduire qu'un mesureur placé sur un circuit à débit variable s'usera moins vite que s'il est placé sur un circuit à débit constant.

24.4.3 Incertitude sur la mesure de température

Le rapport entre les limites supérieure et inférieure de la différence de température ne doit pas être inférieur à 10. La limite inférieure ΔT_{min} doit être indiquée par le fournisseur comme étant soit de 1, 2, 3, 5 ou 10 K. La valeur préférentielle est 3 K.

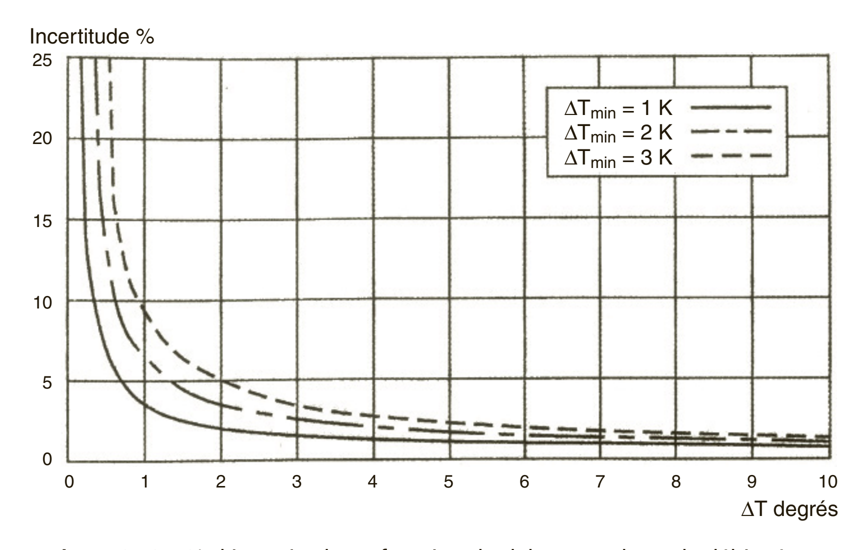


Figure 24.3 – % d'incertitude en fonction du deltaT par classe de débitmètre

L'erreur E_t est fonction de la valeur lue et de la valeur conventionnellement vraie entre les signaux de sortie de la paire de sondes de température et la différence de température.

$$E_t(\%) = \pm\left(0{,}5 + 3\frac{\Delta\theta_{min}}{\Delta\theta}\right)$$

On note que dans l'expression de E_t, se trouve une incertitude relative constante de 0,5 % de la valeur mesurée. Cette incertitude correspond à la sensibilité du capteur lors de sa conversion résistance ⇒ température.

Le terme $3\frac{\Delta\theta_{min}}{\Delta\theta}$ correspond à un décalage constant de la valeur mesurée, en valeur absolue.

On constate que pour les valeurs ΔT_{min} données dans la norme, les incertitudes de décalage sont faibles. Cela nécessite d'appairer les sondes et de compenser les différences résiduelles.

Par exemple, pour un $\Delta T_{min} = 1K$, l'incertitude la plus faible serait de $\pm\frac{3}{100}K$. Il faudrait donc que les dérives de chaque sonde soient de ± 1,5/100 degré.

Tableau 24.4 – Incertitude de température en valeur absolue

ΔT_{min}		Incertitudes en valeur absolue	
		sur la mesure de l'écart par les 2 sondes	**pour chaque sonde**
Valeurs inutilisées dans les catalogues	10 5	**± 3 / 10 (K)** **± 1,5 / 10 (K)**	**± 1,5 / 10** **± 0,75 / 10**
Valeurs trouvées dans la plupart des catalogues	3 2 1	**± 9 / 100** **± 6 / 100** **± 3 / 100**	**± 4,5 / 100** **± 3 / 100** **± 1,5 / 100**
Valeurs hors norme indiquées pour certains produits	0,5 0,2	**± 15 / 1 000** **± 6 / 1 000**	**± 7,5 / 1 000** **± 3 / 1 000**

Pour des ΔT_{min} < 1 K, on remarque des valeurs d'incertitude très faibles, peu compatibles avec l'utilisation industrielle que nous en faisons.

24.4.4 Incertitude due au calculateur

Cette incertitude est principalement due aux défauts de l'amplificateur analogique du signal des sondes de température. Elle est nulle lorsque le signal provient d'un compteur à impulsion. On considère donc uniquement l'incertitude en fonction de la température.
Son expression se résume ainsi :

$$E_c(\%) = \pm\left(0{,}5 + \frac{\Delta T_{min}}{\Delta T}\right)$$

On note que E_c comporte aussi un terme constant (0,5) et un terme qui correspond également à un décalage constant de la valeur mesurée, en valeur absolue, mais 3 fois plus faible que pour la mesure de température par les sondes précédentes.

24.4.5 Conditions d'environnement

Chaque compteur d'énergie doit être utilisé en fonction de sa classification d'environnement. On en distingue 3 :

Classe d'environnement A (usage domestique, installations intérieures)

– température ambiante : + 5 °C à + 55 °C ;
– conditions d'humidité faible ;
– conditions électriques et électromagnétiques normales ;
– conditions mécaniques faibles.

H

RAPPELS DE MÉTROLOGIE

Classe d'environnement B (usage domestique, installations extérieures)

– température ambiante : – 25 °C à + 55 °C ;
– conditions d'humidité normale ;
– conditions électriques et électromagnétiques normales ;
– conditions mécaniques faibles.

Classe d'environnement C (usage industriel)

– température ambiante : + 5 °C à + 55 °C ;
– conditions d'humidité normale ;
– conditions électriques et électromagnétiques normales ;
– conditions mécaniques faibles.

24.4.6 Précautions de mise en place

Elles relèvent du bon sens :

– Avant l'installation, les circuits hydrauliques doivent être soigneusement nettoyés de toutes les impuretés (limailles de fer, boues, sables…).
– Le compteur doit être protégé des risques de vibrations. Les tuyauteries en amont et en aval doivent être fixées de manière adéquate.
– Les câbles transportant les signaux ne doivent pas être positionnés le long des câbles d'alimentation. Ils doivent être fixés indépendamment et à 50 mm minimum de ceux-ci.
– Chaque câble de signal entre les sondes et le calculateur doit être d'un seul tenant et ne comporter aucun raccord.
– La connectique des câbles de signaux doit permettre d'empêcher toute déconnexion non autorisée.
– Prendre des précautions pour éviter les conditions hydrauliques défavorables (cavitation, surpression, coup de bélier).
– Prendre des précautions pour éviter les sources de propagation électromagnétiques (variateur de vitesse, batterie de condensateur, appareillage de commutation, moteurs électriques, lampes fluorescentes…).
– La qualité du fluide caloporteur doit être surveillée (acidité TH < 0,5 °C, alcalinité pH > 9,5 à 20 °C, dépôts…).
– Prévoir si possible des doigts de gants de contrôle.
– Procéder à des relevés des indications du compteur, si possible 4 fois par an, pour estimer la consommation enregistrée et établir des recoupements par rapport aux années précédentes.

24.4.7 Le capteur hydraulique

La canalisation recevant le capteur sera, dans le plan vertical, posée de préférence en décalage par rapport aux canalisations situées au-dessus de lui afin d'éviter une détérioration par des fuites éventuelles. Au minimum, la présence de bride ou de raccord en surplomb du capteur est à proscrire.
Les canalisations amont et aval seront correctement et solidement fixées afin d'éviter les vibrations et de permettre la dépose du capteur.

Le capteur sera installé à une hauteur permettant sa pose, sa maintenance et sa dépose dans des conditions de sécurité satisfaisante. En l'absence d'accès protégé, il se situera entre 0,70 et 0,90 m du sol.
Un soin particulier sera apporté à la pose du capteur hydraulique qui devra se faire sans contrainte excessive due aux canalisations et pièces de raccordements. Le capteur hydraulique est un élément de tuyauterie, il doit être monté conformément aux règles de l'art et règlements en vigueur.
Avant de poser le capteur sur l'installation, le circuit sera soigneusement rincé, le filtre sera si nécessaire nettoyé.

Environnement – Longueurs droites

Le fournisseur doit mettre à disposition des fiches informatives comportant au minimum les informations et les conditions requises pour l'installation du capteur hydraulique dont les longueurs droites amont et aval, exprimées en nombre de diamètres nominaux (DN) du compteur, et dans le même diamètre qui celui-ci, comptées à partir des brides ou raccords amont/aval.
Les longueurs droites varient suivant la technologie du capteur.
En général, une réservation globale égale à 14 diamètres (6 DN + longueur mesureur + 4 DN) est suffisante, sauf pour les mesureurs Woltman axiaux et certains mesureurs à ultrasons.

Tableau 24.5 – Valeurs les plus communément utilisées

Compteur	Longueurs amont/aval (en nombre de diamètre (DN) à partir des brides ou raccords amont/aval)
Jet unique	6 / 4
Jet multiple	0 / 0
Woltman vertical	6 / 4
Woltman axial	12 / 5
Vertical à détection	6 / 2
À ultrasons	10 / 6
Electromagnétique	5 / 2
Fluidique	6 / 2

Toutefois, chaque fournisseur peut se réserver le droit de préconiser des longueurs différentes, à condition de fournir un certificat officiel d'essais (valeur mentionnée dans l'approbation de modèle, résultats validés par un laboratoire d'essais reconnu, brevet déposé, etc.).
L'adjonction d'un organe régulateur ou stabilisateur d'écoulement peut permettre de réduire ces longueurs sous réserve également de présentation de résultats d'essais officiels.

Sens d'écoulement

Veiller au respect du sens d'écoulement dans le capteur hydraulique de débit. Le sens normal d'écoulement est indiqué par une flèche visible sur le corps du capteur. Le non-respect du sens d'écoulement peut être à l'origine de valeurs erronées.

Positionnement

Le capteur hydraulique sera mis en place dans un endroit facilement accessible ; l'emplacement sera défini en fonction de la configuration de l'installation (mesureur sur l'aller ou le retour, montage horizontal ou vertical). Le montage standard d'un capteur de débit devra être réalisé sur la canalisation retour. Il faudra, lors de la commande, spécifier au fournisseur les conditions particulières d'installation pour une bonne programmation de l'enthalpie.

24.4.8 Les capteurs de températures

Environnement

Un espace sera ménagé à proximité des capteurs de température et des doigts de gant de contrôle afin de pouvoir en assurer la dépose, l'accessibilité et le scellé.

Position du capteur de retour

Le capteur de retour doit être positionné au plus près possible du mesureur.

Position dans la veine fluide

L'élément sensible des capteurs de température doit être placé au plus près de l'axe de la veine de fluide. Les installations dont le diamètre de la tuyauterie est ≤ à 40 mm doivent comporter une bouteille (selon la technologie de la sonde) -voir schéma ci-après.

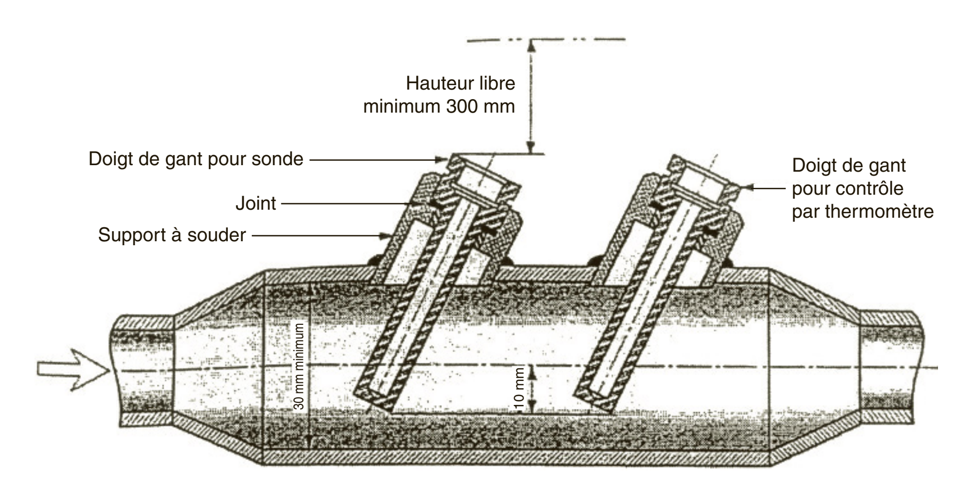
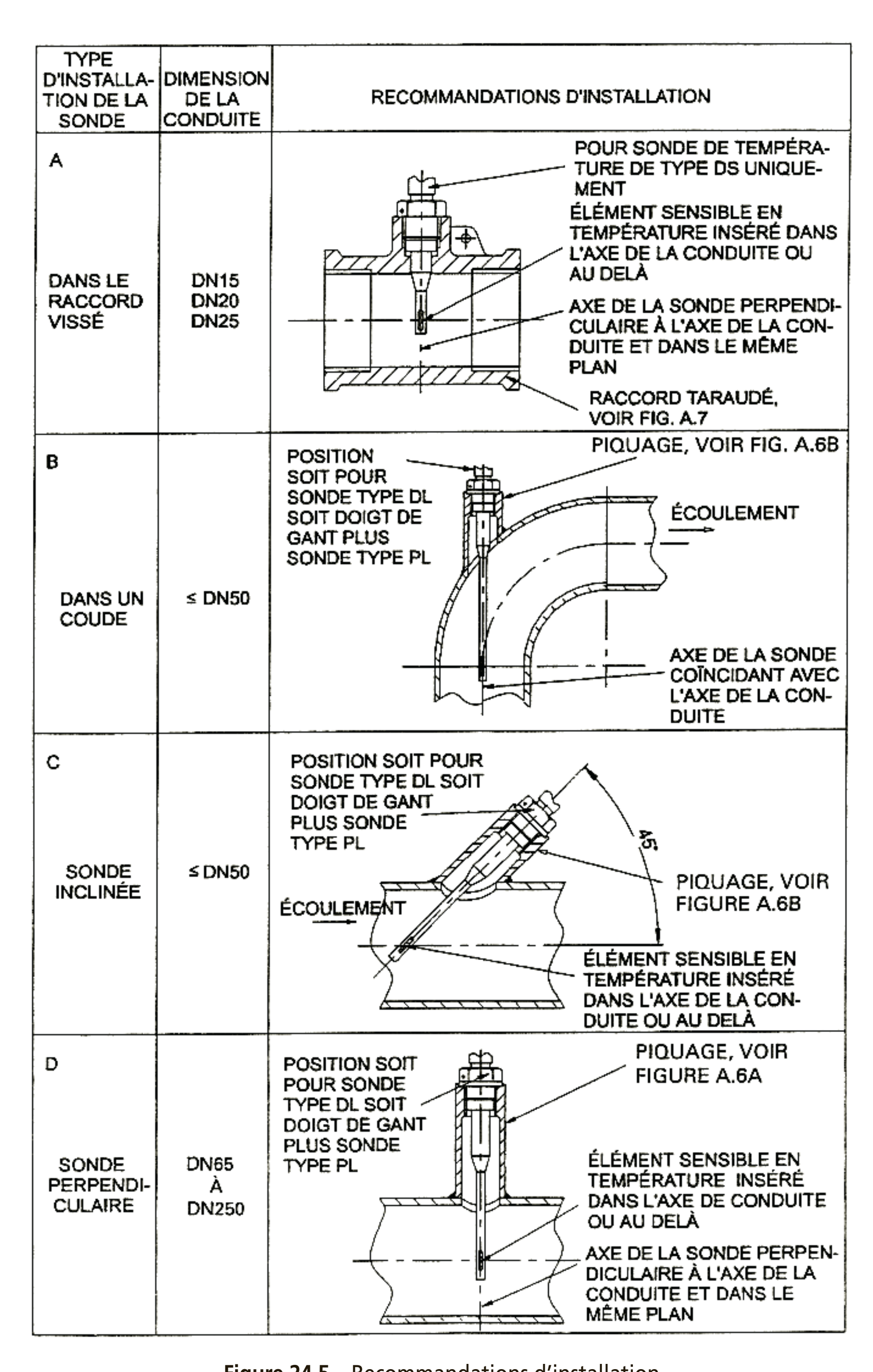


Figure 24.4 – Montage des doigts de gant

La longueur de la bouteille doit être suffisante (250 mm minimum) pour que les sondes ne s'influencent pas mutuellement.

L'implantation du capteur peut également être effectuée dans un coude.

Les schémas suivants (non limitatifs), extraits de la norme NF EN 1434-2 (annexe A) sont donnés à titre d'exemples.



TYPE D'INSTALLATION DE LA SONDE	DIMENSION DE LA CONDUITE	RECOMMANDATIONS D'INSTALLATION
A DANS LE RACCORD VISSÉ	DN15 DN20 DN25	POUR SONDE DE TEMPÉRATURE DE TYPE DS UNIQUEMENT ÉLÉMENT SENSIBLE EN TEMPÉRATURE INSÉRÉ DANS L'AXE DE LA CONDUITE OU AU DELÀ AXE DE LA SONDE PERPENDICULAIRE À L'AXE DE LA CONDUITE ET DANS LE MÊME PLAN RACCORD TARAUDÉ, VOIR FIG. A.7
B DANS UN COUDE	≤ DN50	POSITION SOIT POUR SONDE TYPE DL SOIT DOIGT DE GANT PLUS SONDE TYPE PL PIQUAGE, VOIR FIG. A.6B ÉCOULEMENT AXE DE LA SONDE COÏNCIDANT AVEC L'AXE DE LA CONDUITE
C SONDE INCLINÉE	≤ DN50	POSITION SOIT POUR SONDE TYPE DL SOIT DOIGT DE GANT PLUS SONDE TYPE PL 45° PIQUAGE, VOIR FIGURE A.6B ÉCOULEMENT ÉLÉMENT SENSIBLE EN TEMPÉRATURE INSÉRÉ DANS L'AXE DE LA CONDUITE OU AU DELÀ
D SONDE PERPENDICULAIRE	DN65 À DN250	POSITION SOIT POUR SONDE TYPE DL SOIT DOIGT DE GANT PLUS SONDE TYPE PL PIQUAGE, VOIR FIGURE A.6A ÉLÉMENT SENSIBLE EN TEMPÉRATURE INSÉRÉ DANS L'AXE DE CONDUITE OU AU DELÀ AXE DE LA SONDE PERPENDICULAIRE À L'AXE DE LA CONDUITE ET DANS LE MÊME PLAN

Figure 24.5 – Recommandations d'installation

H

RAPPELS DE MÉTROLOGIE

Le sous-ensemble « capteurs de température » doit être constitué de capteurs de température à résistance de platine ou de nickel appairées.

Le recours à d'autres types de paires de capteurs de température est permis, et ceci lorsque le sous-ensemble comprend des capteurs de température indissociables par le fournisseur.

Pour les canalisations jusqu'à DN 250 inclus, trois types de capteurs de température sont normalisés :

– capteurs courts montés en direct, type DS,
– capteurs longs montés en direct, type DL,
– capteurs longs montés en doigt de gant, type PL.

L'avantage des capteurs à immersion directe est le temps de réponse rapide, du fait du contact direct du capteur dans le liquide caloporteur. Ceci est appréciable pour une bonne mesure dans le cas de changement brusque de température (installation où la puissance est régulée par le ΔT, à débit fixe).

Elles sont à proscrire dans les installations où la sécurité sera préférée à la métrologie (installation haute pression). Le doigt de gant est un très bon organe de sécurité en cas de problème et lors du remplacement des capteurs).

Les types PL et DL peuvent être des capteurs à tête de raccordement ou avoir des câbles non démontables. Le type DS doit avoir uniquement des câbles non démontables (capteurs sans tête de raccordement).

D'autres types de capteurs de température sont admis, mais doivent être testées comme s'ils faisaient partie du calculateur.

Capteurs courts montés en direct de type « DS » (Direct-Short)

La sonde doit être montée perpendiculairement au sens de l'écoulement avec l'élément sensible au minimum au centre de la canalisation. Pour des pressions internes jusqu'à PN 16, la sonde doit être conçue pour pouvoir être montée dans un raccord.

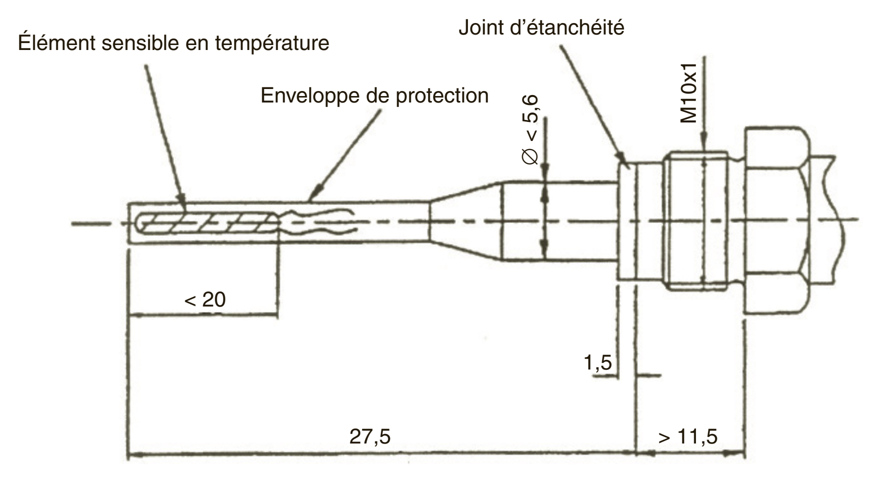


Figure 24.6 – Capteur court

Ces capteurs sont souvent appropriés aux petits diamètres, notamment dans les applications de petites et moyennes puissances (appartements, bureaux, etc.).

Capteurs longs montés en direct de type « DL » (Direct-Long)

Le capteur doit être monté de sorte que l'élément sensible soit inséré au minimum au centre de la canalisation.

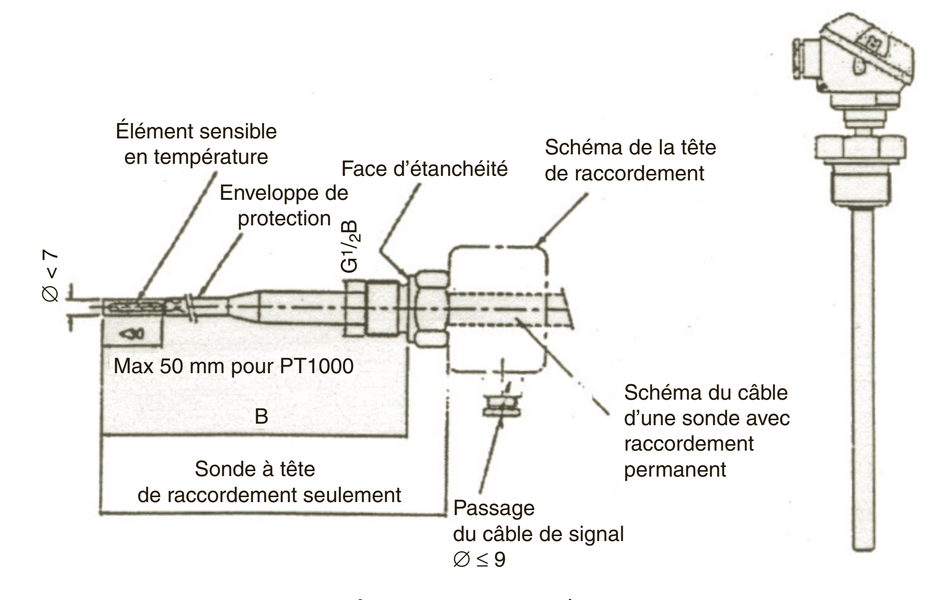


Figure 24.7 – Capteur long

Les longueurs B et C doivent être prises dans le tableau suivant :

B en mm	C en mm
85	105
120	140
210	230

Capteurs longs montés en doigt de gants de type « PL » (Probe-Long)

Le capteur doit être monté de sorte que l'élément sensible soit inséré au minimum au centre de la canalisation.

La longueur A doit être prise dans le tableau suivant :

A en mm
105
140
230

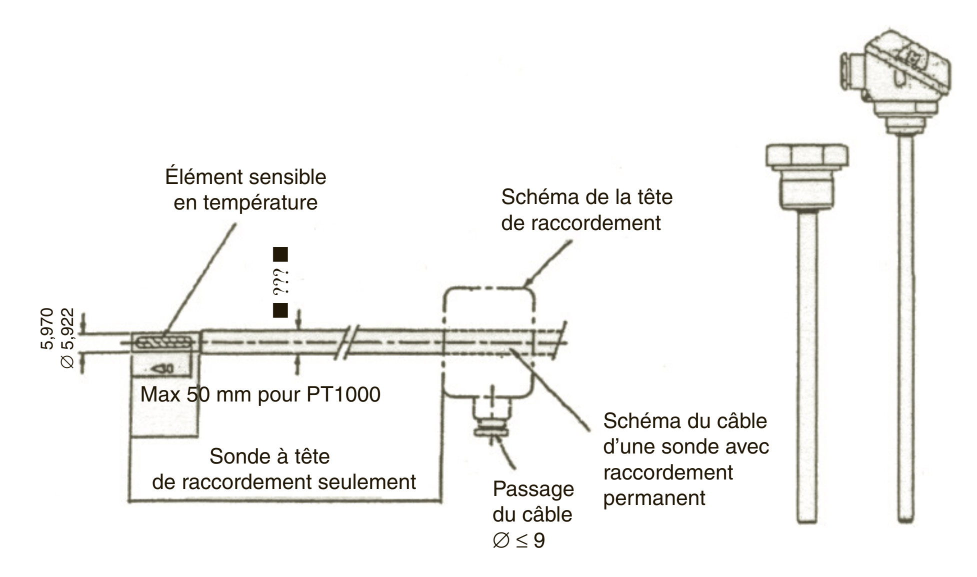


Figure 24.8

Capteurs à 2 conducteurs

La longueur et la section des câbles de signaux de deux capteurs de température appairées doivent être égales. La longueur du câble de signaux fourni par le fabricant ne doit pas être modifiée. La longueur doit être comprise à l'intérieur de la plage des valeurs données dans le tableau ci-dessous.
Longueurs maximales des câbles pour les capteurs de température Pt 100 :

Section du câble en mm^2	Longueur max. pour des capteurs Pt 100
0,22	2,5
0,50	5,0
0,75	7,5
1,50	15,0

Pour des capteurs de résistance plus grande, la limite peut être étendue proportionnellement.
Ce type de capteur est souvent utilisé lorsque les longueurs de câble sont faibles.

Capteurs à 4 conducteurs

Si la longueur de câble mentionnée au paragraphe précédent n'est pas possible, on doit alors avoir recours à la méthode à quatre fils.
Le branchement doit être clairement identifiable pour éviter toute confusion.
Une section de 0,5 mm^2 est recommandée pour les capteurs à tête et une section minimale de 0,14 mm^2 pour les capteurs sans tête.
Ce type de capteur est préféré pour de grandes longueurs de câble ou lorsqu'on ne désire pas avoir deux longueurs identiques.

Capteurs sans tête de raccordement (DS, DL, PL)

Obligatoire pour les capteurs courts à immersion de type DS (métrologie et encombrement).

Capteurs à tête de raccordement (DL, PL)

Recommandées dans le cas des capteurs à 4 conducteurs (encombrement), les têtes de raccordement sont fréquemment utilisées pour tout type de capteurs longs.

BIBLIOGRAPHIE

■ Partie A – Les mesures de débits aérauliques

Norme X 10-106 de septembre 1983 « Mesure de débit des fluides – Calcul de l'erreur limite sur une mesure de débit » ;

Norme X 10-231d'avril 1984 « Distribution et diffusion d'air – Technique de mesure du débit d'air dans un conduit aéraulique » ;

Norme NF X 10-112 de septembre 1977 « Mesure de débit des fluides dans les conduites fermées – Méthode d'exploration du champ des vitesses pour des écoulements réguliers au moyen de tubes de Pitot doubles » ;

Norme NF X 10-113 de novembre 1982 « Détermination du débit des fluides dans les conduites fermées de section circulaire – Méthode par mesure de la vitesse en un seul point » ;

Norme NF X 44-052 de mai 2002 « Émissions de sources fixes – Détermination de fortes concentrations massiques de poussières – Méthode gravimétrique manuelle » ;

Norme FD X 07-014 de novembre 2006 « Métrologie-Optimisation des intervalles de confirmation métrologique des équipements de mesure » ;

Norme NF EN ISO 5167-1 de juin 2003 « Mesure de débit des fluides au moyen d'appareils déprimogènes insérés dans des conduites en charge de section circulaire – Partie 1 : principes généraux et exigences générales » ;

Norme NF EN ISO 5167-2 juin 2003 « Mesure de débit des fluides au moyen d'appareils déprimogènes insérés dans des conduites en charge de section circulaire – Partie 2 : diaphragmes » ;

Norme NF EN ISO 5167-3 de juin 2003 « Mesure de débit des fluides au moyen d'appareils déprimogènes insérés dans des conduites en charge de section circulaire – Partie 3 : tuyères et Venturi-Tuyères » ;

Norme NF EN ISO 5167-4 de juin 2003 « Mesure de débit des fluides au moyen d'appareils déprimogènes insérés dans des conduites en charge de section circulaire – Partie 4 : tubes de Venturi » ;

Norme NF EN ISO 7726 de juillet 2002 « Ergonomie des ambiances thermiques – Appareils de mesure des grandeurs physiques » ;

Norme NF EN ISO 14644-1 juin 1999 de « Salles propres et environnements maîtrisés apparentés – Partie 1 : classification de la propreté de l'air » ;

Norme NF EN ISO 14644-2 de novembre 2000« Salles propres et environnements maîtrisés apparentés – Partie 2 : spécifications pour les essais et la surveillance en vue de démontrer le maintien de la conformité avec l'ISO 14644-1 » ;

Norme NF EN ISO 14644-3 de mars 2006 « Salles propres et environnements maîtrisés apparentés – Partie 3 : méthodes d'essai » ;

Norme NF ISO 7194/X 10-114 de juillet 2008 « Mesurage de débit des fluides dans les conduites fermées – Mesurage de débit dans les conduites circulaires dans le cas d'un écoulement giratoire ou dissymétrique par exploration du champ des vitesses au moyen de moulinets ou de tubes de Pitot doubles » ;

Norme ISO 3966 de juillet 2008 « Mesure du débit des fluides dans les conduites fermées – Méthode d'exploration du champ des vitesses au moyen de tubes de Pitot doubles » ;

Norme ISO 5219 de juin 1984 « Distribution et diffusion d'air. Essai en laboratoire et présentation des caractéristiques aérauliques des bouches d'air » ;

Norme ISO 5221 de janvier 1984 « Distribution et diffusion d'air. Règles pour la technique de mesure du débit d'air dans un conduit aéraulique » ;

Norme ISO 10780 de novembre 1994 « Émissions de sources fixes. Mesurage de la vitesse et du débit-volume des courants gazeux dans des conduites » ;

Norme NF E 51-700 de juillet 1987 « Composants de ventilation mécanique contrôlée – Terminologie » ;

Norme NF E 51-713 d'octobre 2005 « Composants de ventilation mécanique contrôlée (VMC) – Bouches d'extraction pour VMC – Caractéristiques et aptitude à la fonction » ;

Norme NF EN 1507 de juillet 2006 « Ventilation des bâtiments – Conduits aérauliques rectangulaires en tôle – Prescriptions pour la résistance et l'étanchéité » ;

Norme NF EN 12237 de juin 2003 « Ventilation des bâtiments – Réseau de conduits – Résistance et étanchéité des conduits circulaires en tôle » ;

Norme NF EN 13141-1 d'août 2004 « Ventilation des bâtiments – Essais de performance des composants/produits pour la ventilation des logements – Partie 1 : dispositifs de transfert d'air montés en extérieur et intérieur » ;

Norme NF E 13141-2 d'août 2004 « Ventilation des bâtiments – Essais des performances des composants/produits pour la ventilation des logements – Partie 2 : bouches d'air d'évacuation et d'alimentation » ;

Norme NF EN 13779 de juillet 2007 « Ventilation dans les bâtiments non résidentiels – Exigences de performances pour les systèmes de ventilation et de conditionnement d'air » ;

Norme NF EN 14175-1/2/3/4/6 de février 2005 « Sorbonnes – Partie 4 : méthodes d'essai sur site » ;

Norme NF EN 12599 de juillet 2000 « Ventilation des bâtiments – Procédures d'essai et méthodes de mesure pour la réception des installations de ventilation et de climatisation installées » ;

Norme NF EN ISO/CEI 17025 de septembre 2005 « Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais » ;

Techniques de l'Ingénieur TI R 2 110 « Mesures locales de vitesse dans un fluide » ;

Techniques de l'Ingénieur TI R 2 200-v2 « Choix d'un débitmètre » ;

Techniques de l'Ingénieur TI R 2 210 « Détermination du débit des fluides par intégration du champs des vitesses » ;

Techniques de l'Ingénieur TI R 2 220 « Débitmètres à pression différentielle » ;

Techniques de l'Ingénieur TI R 2 272 « Anémomètres à fil chaud ou à film chaud » ;

Techniques de l'Ingénieur TI R 2 520 « Etalonnage et vérification des thermomètres » ;

Les mesures dans les conduits. A.I.C.V.F. ;

Mesures aérauliques, M. DOUCHEZ, Éditions COSTIC ;

Mesures aérauliques, Éditions Industries Thermiques ;

Mesure des débits et des vitesses des fluides, J. LEFEBVRE, Éditions Masson.

■ Partie B – Les mesures de débits hydrauliques

Norme NF X 10-113 de novembre 1982 « Détermination du débit des fluides dans les conduites fermées de section circulaire – Méthode par mesure de la vitesse en un seul point » ;

Norme NF EN ISO 5167-1 à 4 de juin 2003 « Mesure de débit des fluides au moyen d'appareils déprimogènes insérés dans des conduites en charge de section circulaire – Partie 1 : principes généraux et exigences générales » ;

Norme NF ISO 3354 de décembre 1988 « Mesure de débit d'eau propre dans les conduites fermées – méthode d'exploration du champ de vitesse dans les conduites en charge et dans le cas d'un écoulement régulier, au moyen d'un moulinet » ;

Norme NF ISO 7194 de juillet 2008 « Mesurage de débit des fluides dans les conduites fermées – Mesurage de débit dans les conduites circulaires dans le cas d'un écoulement giratoire ou dissymétrique par exploration du champ des vitesses au moyen de moulinets ou de tubes de Pitot doubles » ;

Norme ISO 3966 de juillet 2008 « Mesure du débit des fluides dans les conduites fermées – Méthode d'exploration du champ des vitesses au moyen de tubes de Pitot doubles » ;

Techniques de l'Ingénieur TI R 2 110 « Mesures locales de vitesse dans un fluide » ;

Techniques de l'Ingénieur TI R 2 200-v2 « Choix d'un débitmètre » ;

Techniques de l'Ingénieur TI R 2 220 « Débitmètres à pression différentielle » ;

Techniques de l'Ingénieur TI R 2 260 « Débitmètres à flotteur (rotamètres) » ;

Techniques de l'Ingénieur TI R 2 260-v2 « Débitmètres à section variable » ;

Techniques de l'Ingénieur TI R 2 265 « Débitmètres de débit par ultrasons – mesure en conduite pleine » ;

Techniques de l'Ingénieur TI R 2 270 « Débitmètres thermiques » ;

Techniques de l'Ingénieur TI R 2 275 « Débitmètres électromagnétiques » ;

Techniques de l'Ingénieur TI R 2 280 « Débitmètres à turbine pour liquides » ;

Techniques de l'Ingénieur TI R 2 285 « Débitmètres à vortex » ;

Techniques de l'Ingénieur TI R 2 300 « Débitmètres massiques » ;

Mesure des débits et des vitesses des fluides, J. LEFEBVRE, Éditions Masson.

■ Partie C – Les mesures de température

Norme NF C 42-123 d'août 1997 « Appareils de mesurage électriques – Identification des couples thermoélectriques » ;

Norme NF C 42-324 de juin 2004 « Câbles d'extension et de compensation pour couples thermoélectriques – Composition, nature des matériaux, essais de fabrication » ;

Norme NF X 10-112 de septembre 1997 « Mesure de débit des fluides dans les conduites fermées – Méthode d'exploration du champ des vitesses pour des écoulements réguliers au moyen de tubes de Pitot doubles » ;

Norme X 10-231 d'avril 1984 « Distribution et diffusion d'air – Technique de mesure du débit d'air dans un conduit aéraulique » ;

Norme NF EN ISO 7726 de janvier 2002 « Ergonomie des ambiances thermiques – Appareils de mesure des grandeurs physiques »

Norme ISO 3966 de juillet 2008 « Mesure du débit des fluides dans les conduites fermées – Méthode d'exploration du champ des vitesses au moyen de tubes de Pitot doubles » ;

Norme ISO 10780 de novembre 1994 « Émissions de sources fixes. Mesurage de la vitesse et du débit-volume des courants gazeux dans des conduites » ;

Norme ISO 5221 de janvier 1984 « Distribution et diffusion d'air. Règles pour la technique de mesure du débit d'air dans un conduit aéraulique »

Norme NF EN 60584-1 de février 1996 « Couples thermoélectriques – Partie 1 : tables de référence » ;

Norme NF EN 60584-2 de juillet 1993 « Couples thermoélectriques – Deuxième partie : tolérances » ;

Norme NF EN 60584-3 de juillet 2008 « Couples thermoélectriques – Partie 3 : câbles d'extension et de compensation – Tolérances et système d'identification » ;

Norme NF EN 60751 de novembre 2008 « Thermomètres à résistance de platine industriels et capteurs thermométriques en platine » ;

Norme NF EN 1434 d'août 2007 « Compteurs d'énergie thermique » ;

Norme NF EN 12599 de juillet 2000 « Ventilation des bâtiments – Procédures d'essai et méthodes de mesure pour la réception des installations de ventilation et de climatisation installées » ;

Techniques de l'Ingénieur TI R 2 110 « Mesures locales de vitesse dans un fluide » ;

Techniques de l'Ingénieur TI R 2 510 « L'échelle internationale de température : EIT-90 » ;

Techniques de l'Ingénieur TI R 2 730 « Température de surface – mesure par contact » ;

Laboratoire national de métrologie et d'essais « Guide d'utilisation des capteurs de température de surface » du 23/11/2004 ;

Laboratoire national de métrologie et d'essais « Guide d'étalonnage des capteurs de température de surface en vue d'améliorer l'exactitude des mesures » du 23/11/2004 ;

Instrumentation industrielle, Michel GROUT, Éditions Dunod ;

Les capteurs en instrumentation industrielle, Georges ASCH et collaborateurs, Éditions Dunod.

■ Partie D – Les mesures d'hygrométrie

Norme FD X 15-111 de mai 2004 « Mesure de l'humidité de l'air – Généralités sur les instruments de mesure – Guide de choix et d'utilisation » ;

Norme NF X 15-110 de juillet 1994 « Mesure de l'humidité de l'air – Paramètres hygrométriques » ;

Norme NF X 15-112 de décembre 1994 « Mesure de l'humidité de l'air – Hygromètres à condensation – Caractéristiques » ;

Norme NF X 15-113 de décembre 1997 « Mesure de l'humidité relative de l'air – Hygromètre à variation d'impédance (capacitif et résistif) » ;

Norme NF X 15-117 de juillet 1999 « Mesure de l'humidité de l'air – Hygromètre mécanique » ;

Norme NF X 15-118 de décembre 1996 « Mesure de l'humidité de l'air – Psychromètres – Caractéristiques » ;

Norme NF X 15-119 de juillet 1999 « Mesure de l'humidité de l'air – Générateurs d'air humide à solutions salines pour l'étalonnage des hygromètres » ;

Norme NF EN ISO 7726 de janvier 2002 « Ergonomie des ambiances thermiques – Appareils de mesure des grandeurs physiques » ;

Techniques de l'Ingénieur TI R 2 230 « Air humide » ;

Techniques de l'Ingénieur TI R 3 045 « Mesure des paramètres de l'air humide » ;

La mesure de l'humidité dans les gaz, MM. CRETINON et MERIGOUX, Éditions BNM.

■ Partie E – Les mesures de pression

Norme NF EN 12599 de juillet 2000 « Ventilation des bâtiments – Procédures d'essai et méthodes de mesure pour la réception des installations de ventilation et de climatisation installées » ;

Norme NF EN ISO 14644-3 de mars 2006 « Salles propres et environnements maîtrisés apparentés – Partie 3 : méthodes d'essai » ;

Techniques de l'Ingénieur R 2 040 « Pression usuelles dans les fluides – Instruments et principes de mesure » ;

Techniques de l'Ingénieur R 2 041 « Pression usuelles dans les fluides – Manomètres mécaniques » ;

Techniques de l'Ingénieur R 2 042 « Pression usuelles dans les fluides – Capteurs et transmetteurs » ;

Techniques de l'Ingénieur R 2 043 « Pression usuelles dans les fluides – Mise en œuvre des mesures » ;

Instrumentation industrielle, Michel GROUT, Éditions Dunod ;
Les capteurs en instrumentation industrielle, Georges ASCH et collaborateurs, Éditions Dunod.

Partie F – Les mesures de combustion

Norme FD X 07-014 de novembre 2006 « Métrologie – Optimisation des intervalles de confirmation métrologique des équipements de mesure » ;

Norme NF X 50-010 de novembre 2007 « Contrat d'abonnement pour l'entretien des chaudières à usage domestique utilisant les combustibles gazeux – Présentation des documents contractuels » ;

Norme NF X 50-011 de novembre 2007 « Contrat d'abonnement pour l'entretien des chaudières à usage domestique équipées de brûleurs à pulvérisation utilisant le fioul domestique – Présentation des documents contractuels » ;

Norme NF EN 50291 de janvier 2002 « Appareils électriques pour la détection de monoxyde de carbone dans les locaux à usage domestique – Méthodes d'essais et prescriptions de performances » ;

Inflammation-combustion-pollution, M. ARQUES, Éditions MASSON ;

Réglages combustion, M. LEGOURD, Éditions Parisiennes.

Partie G – Acoustique et vibrations

Norme NF S 30-010 de décembre 1974 « Acoustique – Courbes NR d'évaluation du bruit » ;

Norme NF S 31-010 de décembre 1996et son amendement NF S 31-010/A1 2° tirage 2009-01 « Acoustique – Caractérisation et mesurage des bruits de l'environnement – Méthodes particulières de mesurage » ;

Norme NF S 31-057 d'octobre 1982 « Acoustique – Vérification de la qualité acoustique des bâtiments » ;

Norme NF S 31-080 de janvier 2006 « Acoustique – Bureaux et espaces associés – Niveaux et critères de performances acoustiques par type d'espace » ;

Norme NF S 31-084 d'octobre 2002 « Acoustique – Méthode de mesurage des niveaux d'exposition au bruit en milieu de travail » ;

Norme NF S 31-110 de novembre 2005 « Acoustique – Caractérisation et mesurage des bruits de l'environnement – Grandeurs fondamentales et méthodes générales d'évaluation » ;

Norme NF EN ISO 3744 de novembre 1995 « Acoustique – Détermination des niveaux de puissance acoustique émis par les sources de bruit à partir de la pression acoustique – Méthode d'expertise dans des conditions approchant celles du champ libre sur plan réfléchissant » ;

Norme NF EN ISO 3746 de mai 1996 « Acoustique – Détermination des niveaux de puissance acoustique émis par les sources de bruit à partir de la pression acoustique – Méthode de contrôle employant une surface de mesure enveloppante au-dessus d'un plan réfléchissant » ;

Norme NF EN ISO 10052 de septembre 2005 « Acoustique – Mesurages in situ de l'isolement aux bruits aériens et de la transmission des bruits de choc ainsi que du bruit des équipements – Méthode de contrôle » ;

Norme NF EN ISO 16032 d'avril 2005 « Acoustique – Mesurage du niveau de pression acoustique des équipements techniques dans les bâtiments – Méthode d'expertise » ;

Norme ISO 2631-1 de 1997 « Vibrations et chocs mécaniques – Evaluation de l'exposition des individus à des vibrations globales du corps – Partie 1 : Spécifications générales » :

Norme ISO 2631-2 de 2003 « Vibrations et chocs mécaniques – Evaluation de l'exposition des individus à des vibrations globales du corps – Partie 2 : Vibrations dans les bâtiments (1 Hz à 80 Hz) (en anglais) » ;

Norme NF EN 61672-1 de juin 2003 « Électroacoustique – Sonomètres – Partie 1 : spécifications » ;

Norme NF EN 61672-2 de septembre 2003 « Électroacoustique – Sonomètres – Partie 2 : essais d'évaluation d'un modèle » ;

REEF – Volume II Acoustique, CSTB, 1982 ;

Acoustique et Vibrations, COSTIC, 2003 ;
Acoustique, GECLIM 112, F. CLAIN, COSTIC, 1974 ;
Le bruit des équipements – REFCLIM 382, F. CLAIN, COSTIC, 1974.

■ Partie H – Rappels de métrologie

Norme X 10-106 de septembre 1983 « Mesure de débit des fluides – Calcul de l'erreur limite sur une mesure de débit » ;

Norme NF X 07-001 de décembre 1994 « Normes fondamentales – Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie » ;

Norme FD X 07-007 de décembre 2005 « Métrologie – Guide d'application de la norme NF EN ISO 10012 "Systèmes de management de la mesure – Exigences pour les processus et les équipements de mesure" – Conception, développement, maîtrise et amélioration des processus de mesure ou d'essai » ;

Norme FD X 07-014 de novembre 2006 « Métrologie – Optimisation des intervalles de confirmation métrologique des équipements de mesure » ;

Norme NF EN ISO 10012 de septembre 2003 « Systèmes de management de la mesure – Exigences pour les processus et les équipements de mesure » ;

Norme NF EN ISO 14253 de mars 1999 « Vérification par la mesure des pièces et équipements de mesure » ;

Norme NE EN ISO/CEI 17025 de septembre 2005 « Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnage et d'essais » ;

Norme NF ENV 13005 d'août 1999 « Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure » ;

Dictionnaire pratique de la métrologie, M. BINDI, Éditions AFNOR.

COORDONNÉES DES ENTREPRISES AYANT CONTRIBUÉ AUX RESSOURCES DOCUMENTAIRES

KIMO
Zone industrielle
BP 16
24 700 MONTPON

ENGINEERING MESURES
42-46 rue du 8 mai 1945
93 382 PIERREFITTE cedex

TESTO
19 rue des Maraîchers
57 600 FORBACH

TH Industrie – T.S.I.
131 rue Cardinet
75 017 PARIS

KROHNE SAS
Les Ors
BP 98
26 103 ROMANS cedex

TROX TECHNIK – HESCO
2 place Marcel Thirouin
94150 RUNGIS Ville

SWEGON
10 rue Jules Vercruysse
95 100 Argenteuil

ULTRAFLUX
Technoparc
17 rue Ch. Jeanneret
78 306 POISSY cedex

ENDRESS & HAUSER
3 rue du Rhin
68 331 HUNINGUE cedex

KOBOLD Instrumentation
P.A. des Béthunes
16 avenue du Fief
95 310 Saint Ouen l'Aumône

LUTZ – Société Technique des fluides
Z.I. du Val d'Argent
10 rue J. Poulmarch
95 100 ARGENTEUIL

VALYDINE
11 sente des Groseilliers
77 860 QUINCY-VOISINS

VEGA Technique SAS
Z.A. Nordhouse
15 rue du Ried
67 150 ERSTEIN

AHLBORN
68 rue de la Porte de Paris
78460 CHEVREUSE

01 dB – METRAVIB
15 rue de cadix
75015 PARIS

INDEX

TECHNIQUE ET INGÉNIERIE
Série Froid et génie climatique

GESTION INDUSTRIELLE
CONCEPTION
FROID ET GÉNIE CLIMATIQUE
MÉCANIQUE ET MATÉRIAUX
CHIMIE
ENVIRONNEMENT ET SÉCURITÉ
EEA
AGROALIMENTAIRE

Thierry Dupuis
Guy Delmas

MÉTROLOGIE EN GÉNIE CLIMATIQUE

Que ce soit lors de sa réalisation, de sa maintenance ou de son exploitation, l'efficacité énergétique d'une installation de génie climatique (performance, rendement de génération, consommation d'énergie) ne peut être vérifiée qu'à partir de mesurages permettant d'apprécier la grandeur mesurée dans les meilleures conditions.

Dans cet ouvrage, les paramètres physiques des installations techniques sont regroupés par thème détaillant chacun **les moyens de mesurage** envisageables pour une application de « terrain », **les règles et normes en usage**, ainsi que **les principes physiques** permettant de mieux appréhender les manipulations. Sont abordées de manière détaillée :

- les mesures de débits aérauliques ;
- les mesures de débits hydrauliques ;
- les mesures de température ;
- les mesures d'hygrométrie ;
- les mesures de pression ;
- les mesures de combustion ;
- les mesures acoustiques et vibratoires ;
- la métrologie, les calculs d'erreur, les incertitudes de mesurage et les tolérances.

Cet ouvrage constitue un outil de travail indispensable aux ingénieurs et techniciens en froid et génie climatique (bureaux d'études techniques, entreprises de mise au point et de commissionnement des installations) ainsi qu'aux étudiants du domaine.

THIERRY DUPUIS

est ingénieur-expert en génie climatique et chargé de cours dans le domaine de la métrologie appliquée au génie énergétique à l'École des Mines de Paris-ISUPFERE.

GUY DELMAS

est acousticien dans une agence opérationnelle d'un organisme de contrôle technique. Il est spécialiste et formateur en acoustique et vibrations.





www.dunod.com

ISBN 978-2-10-054270-3